

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Zjištění příčin nevyhovující kvality řezné hrany  
u oceli S355 o tloušťce 260 mm

Determining the Causes of Unsatisfactory  
Quality of the Cutting Edges at Steel  
Grade S355 with Thickness of 260 mm

Student:

Bc. Martin Štencel

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Štencel**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Specializace: 20 Strojírenská technologie

Téma: Zjištění příčin nevyhovující kvality řezné hrany u oceli S355 o tloušťce 260 mm  
Determining the Causes of Unsatisfactory Quality of the Cutting Edges at Steel Grade S355 with Thickness of 260 mm

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii konstrukčních ocelí řady S235 až S355.
2. Zpracujte studii technologie tepelného dělení ocelí.
3. Proveďte vyhodnocení mechanických vlastností, mikrostruktury a chemického složení základního materiálu.
4. Proveďte zkušební řezy s použitím rozdílných technologických parametrů pálení.
5. Vyhodnoťte dosaženou kvalitu zkušebních řezů.
6. Proveďte diskusi dosažených výsledků a vyslovte závěry.

Seznam doporučené odborné literatury:

KUNCIPÁL, J. A KOL. *Teorie svařování*. Praha: SNTL Praha, 1986, 265 s.

KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, Ostrava, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba, technická příprava výroby a kontrola svarových spojů*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 2002, 417 s. ISBN 80-85771-97-1.

KUČERA, J. *Teorie svařování*, VŠB Ostrava 1991.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 15.5.2017

Šend

Podpis studenta

### Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15.5.2017



Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Martin Štencel

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dvořákova 564/6; Mohelnice 789 85



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠTENCL, M. *Zjištění příčin nevyhovující kvality řezné hrany u oceli S355 o tloušťce 260 mm: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2017, 85 s. Vedoucí práce: Krejčí, L.

Diplomová práce se zabývá tepelným dělením konstrukční oceli pomocí řezání kyslíkem, konkrétně kvalitou hrany vzniklého řezu. V teoretické části jsou vysvětleny základní pojmy týkající se oblasti tepelného dělení: jsou popsány a porovnány jednotlivé metody dělení, je objasněn jejich princip, omezení a přednosti. Dále jsou popsány vlastnosti, použití a rozdělení konstrukčních ocelí. V experimentální části je proveden experiment zkoumající vliv způsobu řezání kyslíkem na kvalitu povrchu řezu. Je vybráno pět vzorků řezaných s rozdílnými parametry nastavení kyslíkového hořáku, u nich je sledována a srovnána kvalita řezané hrany - je změřena drsnost, skluz rýh, úhlová úchylka profilu a tvrdost. Jednotlivé výsledky zkoušek jsou porovnány a je z nich vyhodnoceno, jaký vliv má nastavení hořáku na kvalitu řezné hrany.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŠTENCL, M. *Determining the Causes of Unsatisfactory Quality of the Cutting Edges at Steel Grade S355 with Thickness of 260 mm: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2017, 85 p. Thesis head: Krejčí, L.

The master thesis deals the cutting structural steel by the oxy-fuel method, concrete the quality of the cutting edge. In theoretical part is explaining the basic concepts of thermal cutting: are cleared and compared individual methods of cutting, interpreted their principles, limited's and preferences. Next is explaining the properties, use and distribution of construction steels. In practical part is performed an experiment examining the influence of the oxy-fuel cutting method on the quality of the cutting surface. Five samples are cutting with different parameters of the oxy-fuel torch setting, the quality of the cutting edge is monitored and compared of each of them - is measured roughness on cutting surface, drag lines, angular deviation of the profile and roughness. The individual test results are compared and are evaluated, how influence has the setting of torch to cutting surface.

# Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>- 7 -</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>Současný stav řešené problematiky .....</b>	<b>- 9 -</b>
1. Tepelné dělení .....	- 9 -
1.1. Řezání kyslíkem .....	- 10 -
1.1.1. Předpoklady pro řezání .....	- 13 -
1.1.2. Povrch řezu .....	- 14 -
1.1.3. Teplem ovlivněná oblast .....	- 15 -
1.1.4. Hořáky .....	- 17 -
1.1.5. Technické plyny pro řezání .....	- 18 -
1.1.6. Doplnkové metody řezání kyslíkem .....	- 20 -
1.2. Řezání plazmou .....	- 21 -
1.2.1. Plazmové hořáky .....	- 22 -
1.2.2. Druhy plynů .....	- 24 -
1.2.3. Nejčastější problémy řezné spáry .....	- 26 -
1.3. Řezání laserem .....	- 28 -
1.3.1. Interakce laseru s materiálem .....	- 29 -
1.3.1. Laserové hořáky .....	- 30 -
1.3.2. Způsoby dělení laserem .....	- 32 -
1.4. Porovnání metod tepelného dělení .....	- 33 -
2. Konstrukční oceli .....	- 38 -
2.1. Označování konstrukčních ocelí .....	- 38 -
2.2. Oceli pro ocelové konstrukce .....	- 40 -
<b>Experimentální část .....</b>	<b>- 44 -</b>
1. Návrh metodiky experimentální práce: .....	- 44 -
2. Metodika provedení experimentální práce .....	- 45 -
3. Výsledky jednotlivých měření .....	- 54 -
4. Vyhodnocení dosažených výsledků .....	- 75 -
<b>Závěr .....</b>	<b>- 80 -</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>- 81 -</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>- 84 -</b>

**Seznam použitých značek a symbolů**

A	Tažnost materiálu	[%]
a	Tloušťka řezaného výpalku	[mm]
Ce	Uhlíkový ekvivalent	[%]
ČSN	Česká státní norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
FeO	Oxid železnatý	[-]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid železitý	[-]
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Oxid železnato-železitý	[-]
H <sub>2</sub>	Vodík	[-]
ISO	Mezinárodní norma	[-]
ln	Délka měřeného úseku	[mm]
u	Úchylka kolmosti nebo úhlová úchylka	[mm]
N <sub>2</sub>	Dusík	[-]
O <sub>2</sub>	Kyslík	[-]
R <sub>a</sub>	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
R <sub>e</sub>	Mez kluzu	[MPa]
R <sub>eH</sub>	Horní mez kluzu	[MPa]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>z</sub>	Maximální výška profilu	[μm]
R <sub>z5</sub>	Průměrná výška profilu	[μm]
TOO	Teplem ovlivněná oblast	[-]
T <sub>sublim</sub>	Teplota kdy se pevná látka mění na páru	[°C]
T <sub>tav</sub>	Teplota tavení	[°C]
T <sub>zap</sub>	Zápalná teplota	[°C]
Výpalek	Kyslíkem řezaný díl	[-]

## Úvod

Tepelné řezání je v dnešní době produktivním a ekonomicky velice přijatelným způsobem dělení materiálu. Jako první technologií, k tomuto typu dělení, byla metoda řezání kyslíkem, které se i přes nástup novějších a produktivnějších technologií, jako je řezání plazmou či laserem, udržela jako nejrozšířenější metoda tepelného dělení v běžné průmyslové praxi. Může za to především možnost rychlé aplikace do výroby, dostupnost kvalifikované obsluhy i potřebných prostředků, což je nejvíce potřeba pro flexibilní a rychlé řešení zadaných operací. Proto řezání kyslíkem, jakožto relativně jednoduchý proces, zaujímá přední místo v dělení nelegovaných a nízkouhlíkových ocelí v malosériové výrobě.

Teoretická část práce se zaměřuje na současný stav řešené problematiky a popisuje základní technologie tepelného dělení: řezání kyslíkem, plazmou a laserem. Je objasněn jejich princip, rozebrány jejich výhody, nevýhody a omezení. Dále jsou porovnány v oblastech produktivity a ekonomického hlediska. Další část teoretické práce je zaměřena na konstrukční oceli, jejich využití, rozdělení a označování.

Experimentální část diplomové práce se zabývá zjištěním nevyhovující řezné hrany výpalku. K tomu je proveden experiment s několika vzorky konstrukční oceli, které byly řezány kyslíkem, každý s jiným nastavením hořáku (rychlost řezání, tlak, předehřev). Je využito porovnání jednotlivých výsledných parametrů řezané plochy určující její kvalitu: drsnost měřená ve třech místech řezané plochy (v horní, střední a dolní části vzorku), tvrdost na třech odlišných plochách (na pálené ploše, základním materiálu a na teplem ovlivněná hraně vzorku), sklon rýh (skluz) a úhlová úchylka profilu. Cílem práce je zjistit, jaký vliv mají nastavené parametry hořáku a předehřevu na výslednou kvalitu povrchu řezu a určit tak, příčinu vzniku nekvalitní řezné hrany.

## Současný stav řešené problematiky

### 1. Tepelné dělení

Tepelné dělení se zařazuje, v rámci strojírenské výroby, k operacím přípravy materiálu a nachází v ní velmi široké uplatnění. Jedná se o metody dělení materiálu, které se od běžného třískového dělení odlišují tím, že pro úběr materiálu není využita mechanická práce a tak proces řezání neomezuje mechanické vlastnosti materiálu. Většinou se pracuje na principu lokálního tavení, spalování či odpařování a jejich kombinace - energie k uskutečnění těchto procesů se dodává tepelnými zdroji. Tepelným dělením je možno, oproti mechanickým metodám dělení, dosáhnout znatelně vyšší výrobní produktivity a ekonomického efektu. [1, 2]

V praxi jsou nejužívanější tři základní metody tepelného dělení materiálu: [2]

- Řezání kyslíkem - 82
- Řezání plazmou - 83
- Řezání laserem - 84

Každá metoda je jedinečná, má své přednosti, nevýhody a hranice použitelnosti, jak po stránce schopnosti řezat různé druhy materiálu, tak po ekonomickém hledisku. Schopnosti jednotlivých metod se překrývají a tak je někdy obtížné zvolit tu správnou technologii, přičemž její výběr je klíčovým aspektem ke kvalitnímu a hospodárnému dělení materiálu. [1, 2]

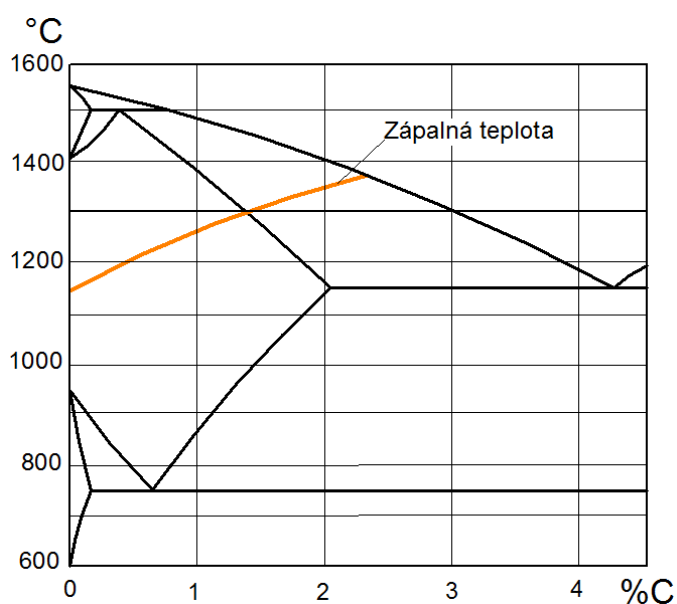
Dříve bylo tepelné dělení nepřesné a řezy nekvalitní, proto mohly mít řezy vliv na výslednou kvalitu svarových spojů na konstrukcích. Jednalo se zejména o přípravu svarových ploch řezáním kyslíkem. Nástup modernějších metod tepelného dělení s koncentrovanějším, užším svazkem energie, tedy laseru a plazmy, znamenal možnost, jak kvalitnějšího a přesnějšího dělení, u kterého již často není potřeba další úprava, tak i tvorby nových konstrukčních řešení, např. laserem lze nahradit stříhání na lisech. [2, 3]

## 1.1. Řezání kyslíkem - 82

Řezání kyslíkem má dlouhou historii, je to nejstarší způsob tepelného dělení kovu. Dnes je to však stále nejznámější a nejpoužívanější metoda tepelného dělení materiálu a to i přes nástup modernějších a výkonnějších technologií. Je tomu díky svým nízkým investičním nákladům, relativně snadnému nasazení a široké oblasti využití. Ve svých začátcích byla tato metoda řezání kovů označována spíše jako doplňkový, pomocný způsob řezání. Nyní je tato technologie rovnocenná či dokonce předčí dělení triskovým způsobem. [2, 3]

Kyslíkem lze řezat díly různých tvarů a počtu kusů, ovšem za předpokladu, že kov je spalitelný kyslíkem, neobsahuje příliš legujících prvků bránících řezání a teplota jeho zapálení je nižší, než teplota jeho tavení. Jinak by totiž nedošlo k hoření (spalování) kovu, ale k jeho vytavování a povrch řezné spáry by nebyl kvalitní, případně by řezné hrany byly nataveny. [2, 4]

Při řezání je nejprve místo řezu hořákem lokálně zahříváno na zápalnou teplotu pomocí nahřívacího, topného plamene; zápalná teplota kovu je teplota, při které kov reaguje s kyslíkem. Musí platit, že: množství uvolněného tepla dodaného je větší, než množství odvedeného tepla. Čím více uhlíku obsahuje ocel, tím je tato teplota vyšší. Zápalná teplota železa je 1150 °C (viz. obr. č. 1 a 2). [2, 3, 4]



Obr. č. 1 - Zápalná teplota v závislosti na obsahu uhlíku v diagramu železo-uhlík [4]

Na místo zahřáté na zápalnou teplotu se dále přivede proud kyslíku; kov začne reagovat s kyslíkem, dochází k rychlé oxidaci, kov vzplane a spaluje se, tvoří se oxidy a ty jsou následně, proudem kyslíku vytlačeny ze vzniklého řezu a vzniká tak řezná spára. Kyslík musí být foukán s dostatečným průtočným množstvím a tlakem, aby se zajistila jeho dostatečná kinetická síla, která zabezpečí odstranění produktů reakce z řezu. Teplota vzniklá při hoření kovu také zajišťuje ohřev okolního materiálu na zápalnou teplotu, což je důležité hlavně ve směru řezání, kde napomáhá plynulosti procesu dělení; pokud by teplo bylo nedostatečné pro ohřev, je možno využít dodatečného přehřevu materiálu a zvýšit tak rychlost a plynulost řezání. Snaha je tedy dosáhnout co největší teploty spalování kovu a volit kovy s co nejnižší tepelnou vodivostí. [2, 4]

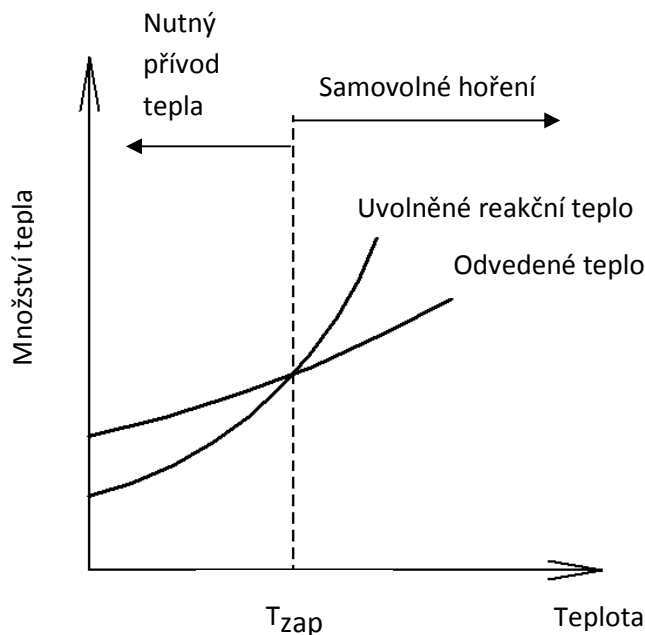
Nejčastěji řezaná ocel je nelegovaná a nízkolegovaná. Uspokojivě je možné řezat plechy až od tloušťky 3 mm, ideální je ale pro silnější ocel (více než 25 mm). Maximální tloušťka není teoreticky omezena. [5]

Řezání kyslíkem je však oproti ostatním metodám tepelného dělení relativně pomalé a málo produktivní, lze však použít několik hořáků současně a produktivitu značně zvýšit. [2, 5]

**Proces dělení kyslíkem lze rozdělit na tři části [2, 4]:**

### **1) Ohřev kovu na zápalnou teplotu**

Děje se pomocí nahřívacího plamene z pomocných trysek nebo hubice hořáku (viz obr. č 3). Jako plyn je nejčastěji používán acetylen, který se mísí s řezacím kyslíkem. Plamen by měl být neutrální, tedy použití směsi kyslíku k acetylenu v poměru 1,2 až 1:1 a to z důvodu chemického složení plamene, který v tomto poměru neovlivňuje roztavený kov. Při ručním řezání se vhodná teplota obvykle pozná podle ohřevu materiálů na žárově červený odstín. Některé hořáky určené na řezání mají nahřívací a řezací hubici umístěnu za sebou a dovolují tak řezat pouze jedním směrem. Na míru zápalné teploty má vliv především čistota kyslíku a množství uhlíku v oceli. Pro dosažení optimální kontinuitnosti procesu musí být chemická reakce a interakce kovu a okysličovadla exotermická (viz obr. č. 2). [2, 4]

Obr. č. 2 - Zápalná teplota  $T_{zap}$  [4]

## 2) Přivedení kyslíku na kov o zápalné teplotě - oxidace kovu

Kov zahřátý na zápalnou teplotu začne po přivedení kyslíku oxidovat: tvoří se tekuté oxidy FeO. V místě, kde dochází k hoření kovu, vzniká působením teploty struska a tekutý kov, tento produkt odstraňován z řezu proudem kyslíku a asistenčním plynem, avšak část taveniny je zároveň tlačena kyslíkem zpět na povrch řezu. Jelikož kovová část taveniny, mající vyšší teplotu tavení než struska složená z oxidů železa, krystalizuje jako první, proto FeO ulpělý na roztaveném kovu oxiduje dále na  $Fe_2O_3$  a na  $Fe_3O_4$ , to je doprovázeno vznikem tepla, které natavuje okolní materiál a napomáhá tak k přehřevu materiálu ve směru řezání. Výsledná tekutá struska je pak tvořená z větší části těchto oxidů (většinu však tvoří FeO) a částečně neoxidovaného železa. Spalováním kovu se vyprodukuje více tepla, než nahřívacím plamenem, který je tedy již v této fázi dělení možné vynechat. [2, 4, 6]



### 3) **Odstranění strusky z řezné spáry**

Děje se vlivem kinetické energie vháněného kyslíku a technického plynu do řezu, kde vytlačí z řezné spáry oxidy a taveninu, v letu se kov zchladí a dopadne na zem v podobě kovového prášku. [2, 4]

#### 1.1.1. **Předpoklady pro řezání**

Aby bylo řezání možné, musí tedy platit [2, 3, 4]:

- kov je spalitelný kyslíkem,
- teplota tavení vzniklých oxidů < teplota tavení řezaného materiálu,
- zápalná teplota kovu < teplota tavení kovu,
- při hoření kovu se musí vyvinout dostatečné množství tepla pro ohřev kovu ve směru řezání v celé řezané tloušťce,
- oxidy a roztavený kov musí být dostatečně tekuté, aby bylo zaručeno, že je proud kyslíku odstraní z řezné spáry,
- tepelná vodivost kovu musí být taková, aby nedocházelo k přílišnému odvodu tepla při řezání,
- kov nesmí mít více legujících prvků, které zhoršují řezatelnost (C, Cr, Si,...) a které podporují kalitnost oceli (W, Mo,...) než je přípustné.

#### **Řezatelnost**

Na řezatelnost kyslíkem, kromě uhlíku, mají vliv ještě další legující prvky obsažené v oceli (viz. tab. č. 1). Záleží u nich především na jejich obsahu a teplotě tavení jejich oxidů. [2, 3, 4]

Tabulka č. 1 - Vliv některých legujících prvků na řezatelnost [4]:

Prvek	Vliv na řezatelnost kyslíkem
<b>Uhlík</b>	Lze řezat do obsahu průsečíku křivky čáry likvidu a křivky zápalné teploty v diagram Fe-C, nad 0,7% se doporučuje předehřev 300 až 650 °C, nad 1 až 1,2% je řezání nemožné.
<b>Mangan</b>	Ocel řezatelná do obsahu 12%.
<b>Síra</b>	Nemá vliv (pokud nepřesahuje obsah stanovený normou).
<b>Chrom</b>	Ocel řezatelná do obsahu 10% Cr.
<b>Molybden</b>	Nepříznivě ovlivňuje řezatelnost.
<b>Nikl</b>	Oceli řezatelné do obsahu 7% Ni, od 7% Ni podmíněně řezatelné.
<b>Měď</b>	Při obvyklém množství v oceli - nemá vliv na řezání.

### 1.1.2. Povrch řezu

Jakost povrchu řezů výpalků dělených kyslíkem je při správném použití metody poměrně kvalitní: povrch řezu je hladký a čistý, na dolní hraně sice většinou zůstane malé množství zatvrdlé strusky a horní hrana je zaoblená vlivem předehřívacího plamene, ale i tak se povrch již často nemusí dále ani upravovat, především pokud jsou řezané díly určeny ke svařování. Pokud již díly nejsou potřeba dále upravovat, označujeme dělení jako přesné řezání. Kvalitu řezů lze zvýšit strojním řezáním, výběrem plynů a nastavením parametrů hořáku. [2, 4, 5]

Povrch řezné spáry má často charakteristické výstupky, žlábký (skluzy) nebo propadliny. Ty vznikají kvůli selektivnímu okysličení řezaného kovu na jejich řezné hraně, kde se základní kov liší svých fázovým a chemickým složením od zbytkového tekutého kovu a oxidů proudících z řezné spáry. [2]

### 1.1.3. Teplem ovlivněná oblast

Jelikož se při řezání základní materiál taví a spaluje, je třeba brát ohled na metalurgické jevy, které tento proces doprovázejí. Šířka teplem ovlivněné oblasti závisí na parametrech nastavení hořáku, způsobu řezání a na chemických vlastnostech materiálu. Hloubka teplem ovlivněné oblasti, pak závisí na obsahu legujících prvků, intenzitě přehřívacího plamene a tloušťce materiálu. [2, 4]

**Teplem ovlivněná oblast se skládá z [2]:**

- Povrchová vrstva – tenká vrstva obsahující částečně natavený kov.
- Hrubo zrná vrstva – sousedí s povrchovou vrstvou, je zde dosaženo teploty nad  $A_{c3}$ .
- Vrstva s jemnou strukturou – zde bylo dosaženo teploty normalizační (těsně nad  $A_{c3}$ ).
- Vrstva částečné překrystalizace – dosaženo teploty mezi  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ .
- Neovlivněný základní materiál – teplota nedosáhla  $A_{c1}$ .

Běžná nelegovaná ocel se při řezání kyslíkem zakalí jen nepatrně, což má vliv na strukturu téměř bezvýznamný a projevuje se jen v oblasti řezu změnou velikosti zrn a výskytem nevyvinutého sorbidu, který však jakost oceli nesnižuje, naopak mírně zlepšuje mez pevnosti bez významného snížení tažnosti a vrubové houževnatosti. [2]

U ocelí s vyšším obsahem uhlíku nebo legovaných ocelí se může, vlivem vyšší prokalitelnosti, kromě sorbidu a perlitu objevit i troosit a martenzit, ten zvyšuje tvrdost a pevnost, plasticita však významně klesá – opracovatelnost značně klesá, sklon k trhlinám za studena se zvyšuje, obzvláště pak u kalených ocelí, které nebyly před řezáním popuštěny nebo normalizovány. U ocelí obtížně dělitelných je nutné zavést přehřev (zmenšit se teplotní spád a zamezit se martenzitické přeměně), aby se omezilo zakalení a snížila se možnost tvorby trhlín. [2]

Vysoké rychlosti ochlazování u ocelí legovaných prvky zvyšující stabilitu austenitu zajišťují, že v určité vrstvě dojde k úplnému zakalení. Mezi touto vrstvou a základním materiálem je přechodná vrstva, ve které dochází k neúplnému zakalení a neúplné normalizaci a ve které lze tedy nalézt perlitické i martenzitické struktury. [2]

Dále je možné, že se při řezání uhlík obsažený v kovu spálí na CO a na CO<sub>2</sub>, tak jako se Fe spálí na FeO. Dochází k tomu, že na řezné ploše dojde k značnému nahličení (obsah uhlíku může místně překročit i 2%); vytváří se tenká vrstva slitiny a může vzniknout martenzit. Je třeba brát na tuto skutečnost zřetel a počítat s tepelným ovlivněním okolního kovu vlivem ohřívacího plamene a reakčního tepla zejména kvůli zvýšení tvrdosti na řezných plochách a možnosti vzniku trhlin. [2, 4]

### **Předeřev**

Nízkouhlíkové oceli do tloušťky 50 mm je možné řezat bez předeřevu. Oceli, u které by hrozil křehký lom, musí být k zamezení tohoto nebezpečí předeřívány. Pokud jsou kalitelné oceli určeny ještě k dalšímu mechanickému zpracování, z důvodu nebezpečí zakalení řezných ploch se výrobek předeřívá, žihá nebo popouští v peci, lze také zavést přídavné hořáky, umístěné za řezacím hořákem, k tepelnému zpracování. Předeřev se provádí jen v případě nezbytnosti, a to jen na minimálně potřebnou úroveň, jelikož se jím zvyšují náklady a zhoršují pracovní podmínky. Uhlíkové oceli je nutné předeřívat, pokud obsahují více než 0,3% uhlíku. Po předeřevu na 300°C je možno výrobek ochlazovat na vzduchu, při více než 300°C předeřevu je nutno chladit v peci. [2, 4]

Pokud se řezaný materiál předeřeje, alespoň na 800°C, platí pak v místě řezu odlišné vlastnosti – u nelegované oceli dochází k oduhličení tím větší, čím větší je teplota předeřevu. [2]

Pokud vynecháme předeřev u ocelí, kde je nezbytný, hrozí vznik trhlin, skrze martenzitické přeměny nebo napětí v materiálu. Značný vliv na tvorbu trhlin má také rychlost ochlazování. [4]

Vzorec pro výpočet uhlíkového ekvivalentu pro stanovení teploty předehřátí pro nelegované a nízkolegované oceli (viz tab. č. 2) [4]:

$$Ce = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4} \text{ [hm. \%]}$$

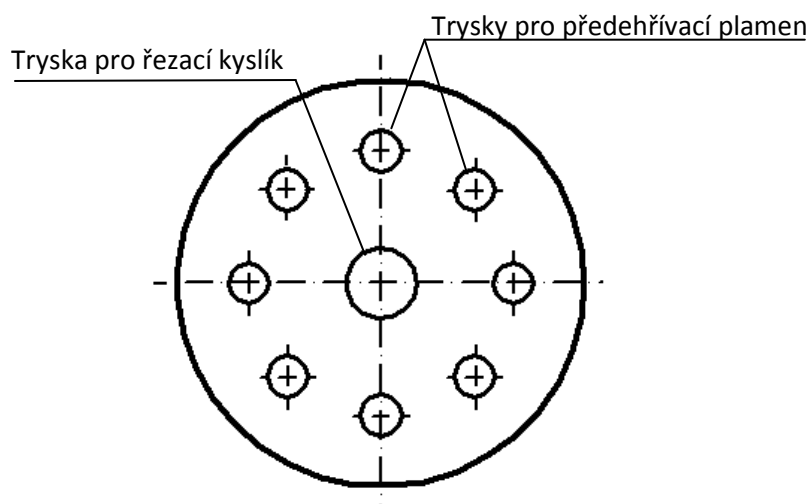
Tabulka č. 2 – Teploty předehřevu pro nelegované a nízkolegované oceli [4]:

Uhlíkový ekvivalent [%]	Teplota předehřátí pro materiály [°C]		Poznámka
	tenké	tlusté	
pod 0,35	-	-	Ochlazení na vzduchu
0,35 ÷ 0,40	-	do 100	
0,40 ÷ 0,50	do 100	100 ÷ 200	Ochlazení v peci
0,50 ÷ 0,60	100 ÷ 200	200 ÷ 300	
přes 0,60	200 ÷ 350	350 ÷ 500	

#### 1.1.4. Hořáky

Pro hrubší řezání se využívá ručních hořáků s přívodem plynů z přenosných láhví nebo z centrálního přívodu. Hořáky jsou vybaveny přípravky pro kruhové, přímočaré či tvarové řezy. Pro přesnější a kvalitnější dělení materiálu se využívá automatických strojních pálicích strojů nebo hořákových systémů, do kterých lze upnout ruční hořák. [2, 3]

Samotný hořák se skládá z těla a z přívodu plynů. Tělo má dva typy trysek: pro kyslík a pro nahřívací plyn. Tryska pro kyslík je obvykle jedna uprostřed hubice a je obklopena tryskami pro nahřívací plyn, které mají menší průměr (viz obr. č 3). Trysky musejí odolávat vysokým teplotám, proto jsou vyrobeny ze slitin na bázi mědi. [2, 3, 4]



Obr. č. 3 - Schéma rozmístění trysek v ústí hubice hořáku [7]

### Kyslíkové kopí

Pro nejhrubější dělení velkých tloušťek lze využít kyslíkové kopí - jedná se o dlouhou dutou trubku naplněnou ocelovými nízkouhlíkovými třískami, dráty nebo tyčemi; kyslík se přivádí do její zadní části. Hrot kopí se zapaluje na opačném konci než je přívod vzduchu a to vnějším zdrojem tepla, po jeho zapálení začne uvnitř probíhat exotermická reakce mezi kyslíkem s ocelovou náplní, takto vzniká potřebná teplota pro řezání. V procesu je spalována i samotná trubka a náplň slouží ke zpomalení jejího úbytku. Kopí se využívá především u pálení hlav ingotů. [3, 8]

#### 1.1.5. Technické plyny pro řezání

Topný hořlavý plyn tvoří podstatnou část energie procesu. Lze použít různé plyny, které se mísí s kyslíkem (viz tab. č. 3). Použitý plyn má různé dopady na proces řezání a jeho výsledek. Hlavními vlastnostmi plynu jsou rychlost hoření, teplota plamene, výkon v primárním pásmu spalování. Nejpoužívanější je acetylen  $C_2H_2$ , jelikož při hoření s kyslíkem dosahuje vysoké teploty plamene (až  $3140^{\circ}C$ ), největší rychlosti hoření a nejvyšší výkon primárního plamene – to zajišťuje oproti ostatním plynům nejrychlejší řezání. Vodík, Ethen a zemní plyn se používá zejména pro řezání velkých tloušťek. Kyslík musí být s minimální čistotou alespoň 98,5%, standardně se ale používá běžný technický kyslík čistoty 2.5 (99,5%) tedy běžný technický kyslík. [2, 3, 4, 6]

Tabulka č. 3 – Druhy topného plynu [4]:

Vlastnosti	Rozměr	Acetylen	Svítiplyn	Vodík	Propan	Zemní plyn
Měrná hmotnost	$\text{Kg} \cdot \text{cm}^{-3}$	1,17	0,50	0,09	2,02	0,75÷1,00
Horní výhřevnost	$\text{kJ} \cdot \text{m}_n^{-3}$	59000	asi 17900	12750	105000	37600÷46000
Spodní výhřevnost		56800	asi 15600	10750	92000	33900÷42200
Hranice zápalnosti na vzduchu	Objem %	3÷82	6÷35	4÷75	2,1÷9,5	5÷15
Hranice zápalnosti v kyslíku		3÷93	-	4,5÷95	2÷48	-
Nejnižší zápalná teplota na vzduchu	$^{\circ}\text{C}$	335	560	510	510	640
Nejnižší zápalná teplota v kyslíku		300	450	450	490	640
Rychlost hoření na vzduchu	$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	131	64	267	32	40
Rychlost hoření v kyslíku		1350	705	890	Asi 400	-
Měrný výkon plamene	$\text{kJ} \cdot \text{cm}_n^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	44,70	12,55	13,80	10,45	12,55
Teplota plamene v kyslíku	$^{\circ}\text{C}$	3200	Asi 2700	2000	2800	2750
Teoretická spotřeba kyslíku	$\text{m}_n^3 \cdot \text{m}_n^{-3}$	2,5	0,84	0,5	5	-
Mísicí poměry	$\text{m}_n^3 \text{O}_2 \cdot \text{m}_n^{-3}$	1,00÷1,75	0,60÷0,65	0,25÷0,35	3,00÷3,50	1,50÷2,00

### 1.1.6. Doplnkové metody řezání kyslíkem [3, 4]:

#### Řezání kyslíkem s pomocí prášků:

Přidání prášku do řezacího paprsku plamene se využívá hlavně u materiálů, které by byly jinak kyslíkem obtížně řezatelné, podmíněně řezatelné nebo neřezatelné. [4]

#### Využívá se [3, 4]:

- Železného prášku - prach je do plamene vháněn stlačeným vzduchem samostatnou trubičkou nebo speciálním kanálkem vbudovaným přímo v hořáku. Při střetu s kyslíkovým plamenem prach z části vzplane a podpoří tak tepelný efekt hoření. Další jeho část se roztaví a stane se součástí původní strusky, tím se původní struska zředí a tak se stane tekutější. Poslední část prášku zůstane nespálená a netekutá a svým mechanickým dopadem rozruší oxidické vrstvy a vytlačí strusku z řezu. Metoda je vhodná spíše pro destruktivní práci, jelikož přidaný železný prášek snižuje kvalitu řezné plochy. Je to nejčastější doplnkový způsob řezání kyslíkem, vhodný především pro vysokolegovanou ocel, korozivzdornou ocel, litiny, hliník a neželezné kovy. [3, 4]
- Křemičitého písku - přidáním písku do řezného paprsku se zajistí mechanické odstranění strusky vlivem dopadajících zrn křemíku, která protrhnou oxidické vrstvy a zároveň vytlačí strusku ze spáry. Metoda se příliš nepoužívá, z důvodu použitelnosti pouze pro omezené tloušťky a zhoršení pracovního prostředí. [3, 4]
- Práškových tavidlových přísad - směs tvoří především uhličitan sodný a hydrogenuhličitan sodný. Směs zajišťuje hlavně změnu chemického složení vysokotavitelných oxidů na tekutější alkalické strusky, které lze jednodušeji odstranit a dále mechanicky podporuje odplavování strusky. Výjimečně používaná metoda. [3, 4]



**Řezání směsí kyslík-benzín:**

Benzín je v tekutém stavu a hermeticky uzavřen (kvůli bezpečnosti) přiváděn do trysky kde se vypaří a výpary se přidají ke kyslíku. Tím se zajistí rychlejší řezání, než s použitím acetylenu jako topného plynu, možnost řezání několika plechů na sobě i s mezerou až 12 mm. Dosáhne se kratšího přehřevu (cca 4 s). Lze řezat až do tloušťky 350 mm. [3]

**1.2. Řezání plazmou**

Řezání plazmou vzniklo z konceptu řezání pomocí dutých ocelových elektrod se stabilizačním obalem, v nichž byl dutinou vháněn kyslík. Řezy prováděné tímto způsobem však byly velmi nekvalitní. Až plazmová oblouková technologie našla uplatnění pro řezání vysokolegované oceli, neželezných kovů a žáruvzdorných materiálů. [2, 4]

Teplo při tomto druhu dělení je vytvářeno v hořáku přeměnou elektrické energie na tepelnou, v podobě proudu plazmy. Princip řezání je založen na roztavení a odpaření materiálu velmi vysokou teplotou plazmy a následné odstranění této taveniny z řezné spáry kinetickou energií plazmových plynů. Nezáleží zde tedy na oxidaci kovu jako je tomu u řezání kyslíkem a tak lze plazmou řezat i kyslíkem neřezatelné kovy (hliník, vysokolegované oceli, slitiny, nekovy). [2, 3]

Plazma je vodivý stav plynu tvořený z iontů, elektronů, vybuzených a neutrálních atomů a molekul. Aby vznikla, je nutné ionizovat plazmový plyn, tedy uvolnit elektrony z atomů plynu tak, aby vznikly záporně nabitě elektrony a ionizovaná jádra mající kladný náboj. Ionizace se dosáhne skrze vhodný stabilizovaný elektrický oblouk. Ve skutečnosti je však již elektrický oblouk samotný vlastně plazmou. [2, 4]

Uvolněné elektrony pak mohou vést elektrický proud a plyn se stává elektricky vodivým. Pokud se má ionizovat dvouatomový plyn je nejprve nutná disociace plynu, tedy rozložení molekul na atomy, které se teprve pak mohou ionizovat. Ionizace může být částečná nebo úplná, technická praxe využívá jen částečně ionizovanou, neizotermickou plazmu tvořenou při teplotě 5000 až 15000K. Teplota plazmy je závislá na plynech, ze kterých se vytvoří (viz tab. č. 4). [2, 3, 7]

Tabulka č. 4 - Teplota plazmy v závislosti na plazmovém plynu [7]:

<b>Plyn pro vznik plazmy</b>	<b>Teplota plazmy [K]</b>
<b>Vodík</b>	<b>8000</b>
<b>Dusík</b>	<b>7000</b>
<b>Argon</b>	<b>15000</b>
<b>Hélium</b>	<b>20000</b>

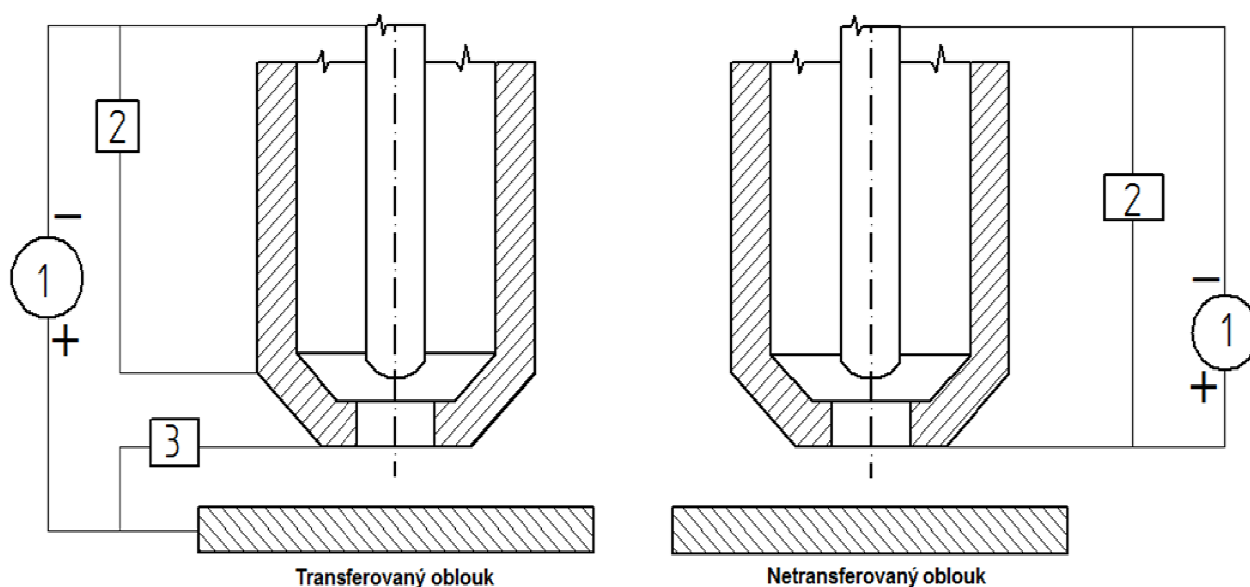
Z plazmového plynu se na plazmu přemění jen část (10 až 30 %), zbytek plynu slouží k usměrnění oblouk tak, aby se plazmový plyn nedotýkal stěn trysky hořáku a neroztavil ho. [7]

### 1.2.1. Plazmové hořáky

Hořáků je mnoho druhů; mohou být ruční (pro hrubé práce) či strojní. V těle každého hořáku musí být přívod pro potřebné plyny (plazmový, ochranný a asistenční), které se na konci hořáku usměrňují tryskou. Trysky musejí splňovat nejnáročnější požadavky na tepelnou odolnost, proto jsou často vyráběny z mědi a plátovány niklem. Dále hořák obsahuje netavící se elektrodu, ta je katodou a bývá vyrobena z mědi s niklovým povrchem s obsahem hafnia, které chrání elektrodu v průběhu řezání (hafnium ve vzduchu oxiduje pomaleji než wolfram). Anodou je pak buď řezaný materiál, nebo část hořáku (viz obr. č. 4). Nakonec obsahuje ochranný kroužek, který ochlazuje plyn v blízkosti trysky a fokusuje oblouk. [3, 7]

Hořáky se rozdělují podle toho, mezi čím je tvořen elektrický oblouk na hořáky s [2, 3, 4, 12]:

- Přeneseným (závislým, transferovaným) obloukem - oblouk se zde tvoří mezi elektrodou a vodivým děleným materiálem. Vhodné pro tenké i tlusté kovové materiály (viz tab. č. 4). [3, 4, 12]
- Nepřeneseným (nezávislým, netransferovaným) obloukem - oblouk se tvoří mezi elektrodou a tělesem hořáku (používá se u nevodivého materiálu). Používá se především u malých tloušťek, neboť řezací tryska je používána jako anoda (viz tab. č. 4). [3, 4, 12]



1 - zdroj proudu; 2 - vysokofrekvenční zdroj; 3 - odpor pomocného oblouku;  
4 - dělený materiál, 5 - netavicí se elektroda; 6 - plazmový plyn

Obr. č. 4- Schéma plazmového hořáku s transferovaným a netransferovaným obloukem

[3]

### 1.2.2. Druhy plynů

**K řezání plazmou se pro různé účely používají tři druhy plynů [12]:**

- 1) Ionizační, řezací, plazmový plyn - skrze něj proniká proud elektronů, čímž vznikají ionizované plyny a plazma. Volí se podle druhu řezaného materiálu. Nejčastěji se používá argon, dusík, vodík, kyslík a jejich směsi. Spotřeba plynu se pohybuje od 0,5 do 7 l/min. [9, 12]
- 2) Asistenční, ochranný plyn - tento plyn má úkol oddělovat plazmat a místo řezu od okolního prostředí a tak řez chránit před oxidací. Používá se nejčastěji argon, dále pak dusík, vodík, kyslík a vzduch. Spotřeba plynu je od 3-12 l/min. [9, 12]
- 3) Fokusační plyn - zaostřuje paprsek plazmy po východu z hořáku s cílem zvýšení kvality řezu, podpory odstranění roztaveného kovu z řezné spáry a zajištění delší životnosti komponentů hořáku. Používá se argon, dusík, směs argonu a vodíku a směs argonu a dusíku. Spotřeba je v rozmezí 2-16 l/min. [9, 12]

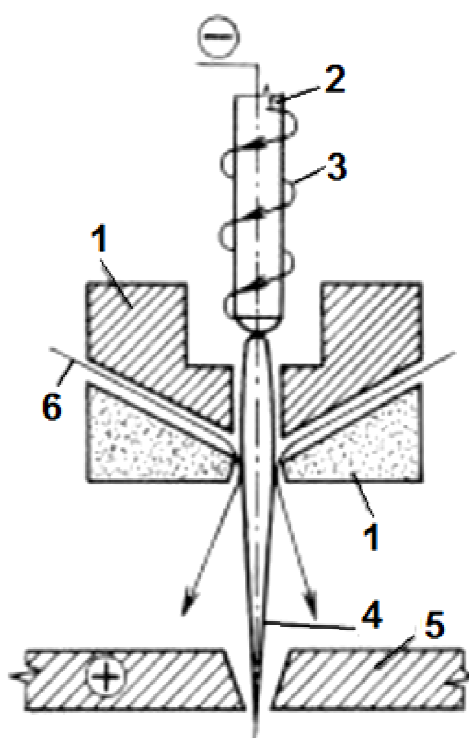
Výběr vhodné kombinace plynů je pro každý materiál rozdílná a jejich volba ovlivňuje kvalitu řezu. Pro konkrétní skupiny materiálů je doporučená volba plynů (viz tab. č. 5) [7, 11]

*Tabulka č. 5 - Doporučené plyny pro plazmové řezání dle řezaného materiálu [11, 12]:*

Řezaný materiál	Plazmový plyn	Ochranný plyn
Konstrukční ocel	O <sub>2</sub> , Ar, N <sub>2</sub>	Vzduch, O <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>
Korozivzdorná a vysoce legovaná ocel	N <sub>2</sub> , Ar+H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Ar, O <sub>2</sub>
Kompozitní materiály	Vzduch, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , Ar+H <sub>2</sub>	Vzduch, N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>
Neželezné materiály	Vzduch, O <sub>2</sub> , Ar+N <sub>2</sub> , Ar+H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>

**Dle stabilizace lze hořáky dělit [2, 3, 12]:**

- S vodní stabilizací - plazmový plyn se získá rozkladem vodní páry na vodík a kyslík (viz obr. č. 5). Může zde být použita uhlíková elektroda. Roztavený materiál se ve vodě ochladí a usadí na dně v podobě prášku. Voda v procesu příznivě působí na pracovní podmínky, sníží se hluchnost a záření, svým chladícím efektem omezuje teplem ovlivněné pásmo a snižuje vnitřní pnutí materiálu. Hořák s vodní sprchou má bočními kanálky přiváděnou vodu do trysky a řezaný materiál je ponořen spodní stranou do vody (vodní lůžko). Proces může také probíhat úplně pod vodou, pak odpadne hluk a záření úplně. Tyto hořáky jsou však velké a jejich ovládání je obtížnější (zapalování probíhá přetavováním hliníkového drátu) ale zároveň je tato metoda považovaná za nejekologičtější. [2, 4, 7, 12]



1 – těleso hořáku; 2 – katoda; 3 – přívod plynu,  
4 – paprsek plazmatu; 5 – obrobek; 6 – přívod vody

Obr. č. 5 - Plazmový hořák s vodní stabilizací [12]

- S plynovou stabilizací- plynová stabilizace se používala především v minulosti. Jedná se o argon, dusík, vodík a jejich kombinace, každý z nich má své přednosti a hodí se pro různé situace a materiály (viz tab. č 6). [2, 3, 12]

- Se vzduchovou stabilizací - nepoužívanější stabilizace díky dostupnosti a cenové výhodnosti stlačeného vzduchu. Velkou výhodou je možnost značně zvýšit průtok vzduchu (což je u vzduchu ekonomicky možné) a tím dosáhnout intenzivnějšího, zúženého sloupce elektrického oblouku, také se snižuje teplota povrchovým vrstev sloupce plazmatu, to zapříčiní kvalitnější řezné plochy, větší řeznou rychlost a užší řeznou spáru. Nevýhodou pak je oxidace spodní hrany řezu vlivem přítomnosti kyslíku. [2, 3,]

Tabulka č. 6 - Charakteristika stabilizačních plynů pro plazmové řezání [3]:

Stabilizační plyn	Charakteristika
<b>Argon</b>	Poskytuje dobrou stabilitu oblouku a snadné zapalování (díky nízké ionizační energii), dále vlivem jeho vysoké atomární hmotnosti zajišťuje snazší vyfukování roztaveného kovu ze spáry.
<b>Vodík</b>	Díky své vysoké tepelné vodivosti snáze přenáší teplo na řezaný materiál.
<b>Dusík</b>	Hlavní jeho výhoda je nízká cena. Také má dobrou tepelnou vodivost. Když se přidá jako přísada do ostatních plynů, tak se tím zamezuje tvorba strusky ztvrdlé na dolní hraně řezné spáry. Avšak vlivem plazmatu se z něj tvoří nitrózní plyny.
<b>Kombinace argonu a vodíku</b>	Optimální výsledky co se teploty plazmy, řezné rychlosti a kvality řezu týče.

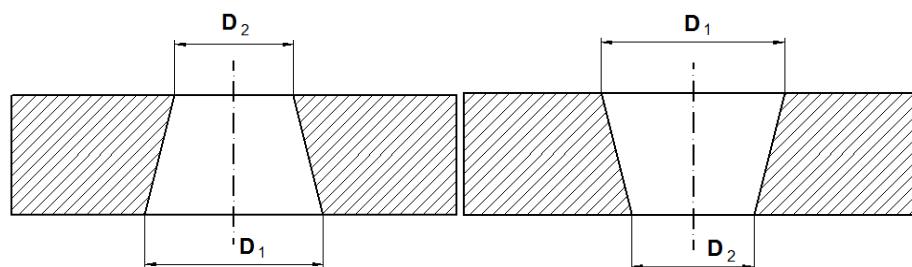
### 1.2.3. Nejčastější problémy řezné spáry [10]:

#### Rovina řezu

Jedná se především o zaoblené hrany. K tomu obvykle dochází u tenkých materiálů o malé tloušťce (menší než 6 mm). Příčinou je velký elektrický proud nebo překročení výkonu. Dále podpal horní hrany (okraje řezu zakřiveny směrem dovnitř) - důvodem bývá přílišná blízkost hořáku s řezaným materiálem. [5, 10]

## Úhel řezu

Špatný úhel řezu je obecně způsoben nesprávně nastaveným hořákem, zprohýbaným nebo zvlněným materiálem, opotřebovanými nebo poškozenými tryskami. Pokud je chyba negativní úhel je možné že se řezalo malou rychlostí, nízkým napětím oblouku. Positivní úhel řezu může být způsoben vysokým napětím oblouku, přílišnou rychlostí řezání, nesprávným nastavením elektrického proudu nebo řezání přílišné tloušťky kde s přibývajícím tloušťkou klesá kinetická síla plasmy (viz obr č. 6). [6, 10]



Obr. č. 6 - Positivní (vlevo) a negativní (vpravo) úhel řezu [10]

## Kvalita povrchu (hrubost)

Jedná se o hrubost povrchu řezu zaviněnou, buď procesem, nebo zářením. [10]

Možné důvody [10]:

- opotřebované nebo poškozené spotřební materiály,
- příliš vysoký průtok plynu,
- nečisté koleje stroje, kola, pastorky a/nebo ozubené hřebeny,
- nerovnoběžnost kolejí stroje,
- opotřebovaná, poškozená anebo uvolněná kola či ložiska.

## Struska

Existují tři druhy strusky tvořené při plazmovém řezání: struska tvořená při vysoké řezné rychlosti (může být způsobeno i vysokým napětím), struska tvořená při nízké rychlosti (může být způsobeno i malým napětím) a povrchová struska (vzniklá rozstříkem na povrchu materiálu, způsobena rychlým řezáním nebo vysokým napětím). Moderní plazmové systémy jsou schopny dělit materiál bez vzniku strusky [5, 10]

### 1.3. Řezání laserem

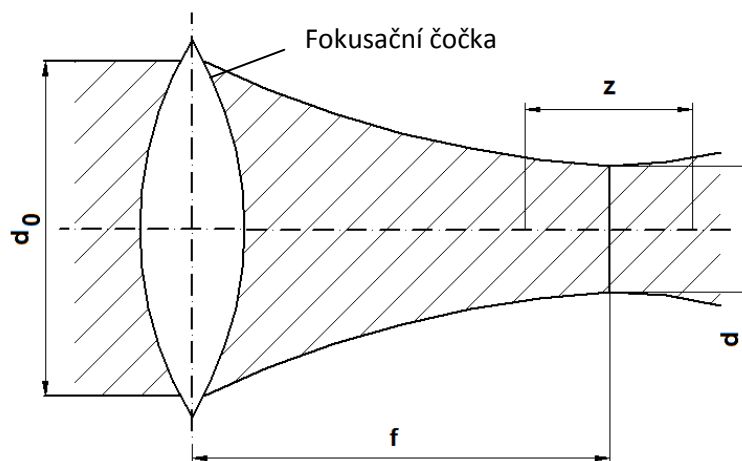
Řezání laserovým paprskem je založeno na tepelném principu, kdy se materiál z řezu vypařuje nebo odtavuje. Teplo zde vzniká přeměnou světelné energie; ta je vyzařena v podobě laserového paprsku, který se při dopadu na řezaný materiál přemění na teplo. [7, 14, 15]

Laser je vlastně vlnění optického druhu patřící do skupiny elektromagnetického záření oproti jiným zářením se odlišuje svou vlnovou délkou. Od přirozeného světla se laserový paprsek odlišuje tím že je koherentní a monochromatický. [7, 13]

Laser se tvoří zesilováním světla stimulovanou emisí záření. Elektrony v aktivním médiu (plyn, kapalina, krystal) jsou vybuzeny dodávanou energií na vyšší energetickou hladinu; dochází k excitaci, až se do vyšší energetické hladiny dostane většina elektronů, vzniká inverzní populace. Když pak elektrony začnou opět sestupovat na nižší energetickou hladinu, mají tendenci vyzařovat energii v podobě fotonů. Fotony reagují s dalšími elektrony inverzní populace - děje se stimulovaná emise fotonů. Tento děj probíhá v rezonátoru tvořeném zrcadly umístěnými naproti sobě, mezi nimiž je aktivní prostředí. Paprsek fotonů se odráží od zrcadel a neustále prochází aktivním prostředím, tím dochází k exponenciálnímu zesilování toku fotonů. Výsledný, dostatečně silný paprsek, opouští rezonátor skrze polopropustné zrcadlo v podobě paprsku laseru. [7, 13, 14]

Tento paprsek je však zatím v průměru řádově milimetrů a není ještě natolik silný, aby po dopadu na materiál vytvořil potřebnou teplotu pro dosažení bodu tavení. Je třeba ho nejprve fokusovat pomocí vhodné čočky na užší a intenzivnější paprsek, již vhodný pro řezací účely. Průměr stopy zfokusovaného paprsku je závislý na vzdálenosti čočky, vlnové délce laseru a průměru paprsku (viz obr. č. 7). Je třeba také dosáhnout vysoké hustoty paprsku zaručenou malou rozbíhavostí záření v paprsku - toho se dosahuje rozšiřovací technikou založenou na systému více čoček. [7, 14]





$d_0$  - průměr čočky;  $f$  - ohnisková vzdálenost čočky;  $d$  - průměr zfokusovaného paprsku v ohniskové rovině čočky;  $z$  - hloubka ostrosti

Obr. č. 7 - Fokuse paprsku čočkou [7]

### 1.3.1. Interakce laseru s materiálem

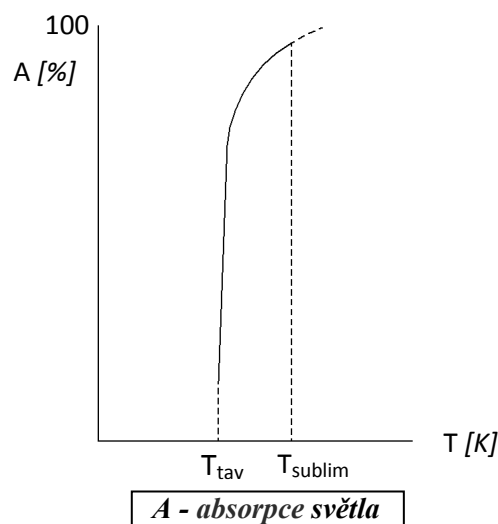
Po dopadu laserového paprsku na materiál, se část z jeho záření odrazí, část projde materiálem a část se absorbuje, právě absorpce vytváří potřebné teplo, které překročí sublimační teplotu a dochází k vypařování kovu, vznikají kovové páry a ty tvoří paroplynový kanál. Plynový kanál je po stranách obklopen vrstvou tekutého, roztaveného a zkondenzovaného kovu. Pokud má materiál menší absorpci, záření tolik neproniká do materiálu a dochází tak k přehřívání podpovrchových vrstev, ty se vlivem přehřátí explozivně trhají a odlupují. [3, 7, 15]

Teplem ovlivněná oblast záleží především na výkonu laseru, plošné hustotě výkonu záření, časem dopadání laseru a optickými vlastnostmi materiálu. [7]

Je důležité, aby měl materiál co nejmenší odrazivost světla, tomu lze napomoci např.: [7, 15]

- zdrsňením povrchu,
- vytvořením krycí vrstvy na povrchu,
- posypáním řezaného místa vrstvou prášku s malou odrazivostí,
- zoxidování povrchu.

Jakmile se však materiál vlivem laseru zahřeje na vysokou teplotu, odrazivost materiálu klesá (viz obr. č. 8). [7]



Obr. č. 8 - Závislost absorpce a teploty [7]

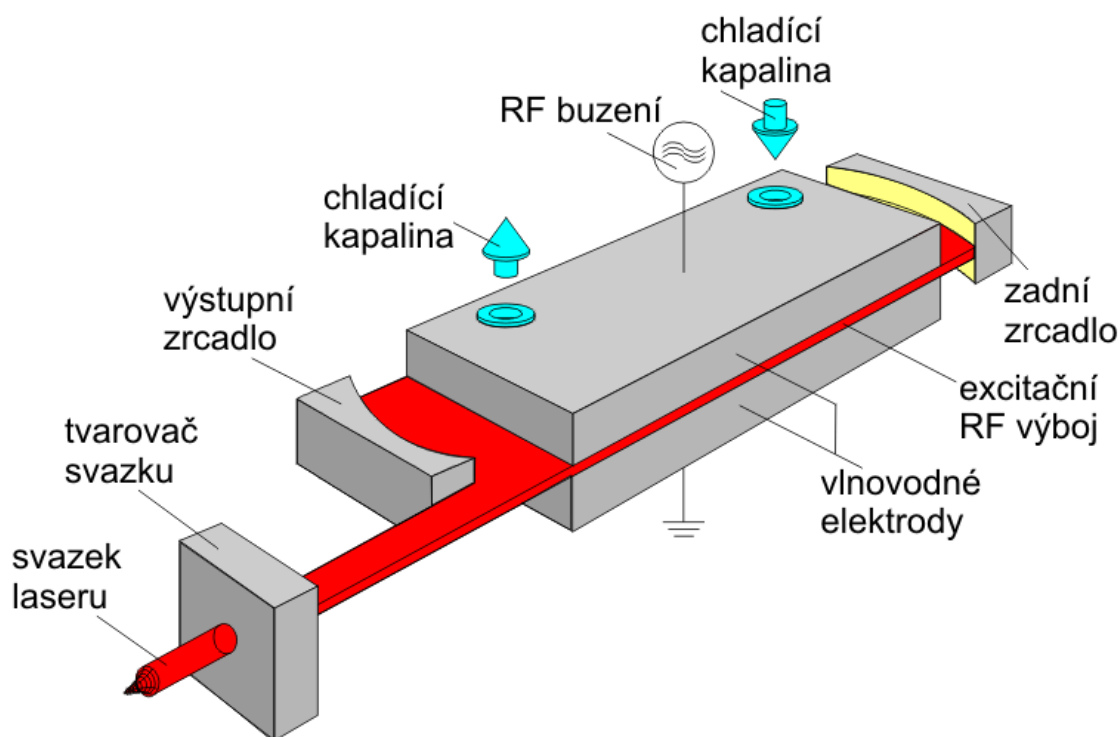
Při řezání je velmi důležité odstraňovat roztavený materiál a kovové páry vzniklé roztavením. K tomu se využívá pomocný plyn, přiváděný do místa řezu pod tlakem z trysky hořáku. Používá se kyslík, argon a vzduch. S vhodným asistenčním plynem se zvyšuje tloušťka materiálu, který je možno řezat. Vzduchem a kyslíkem lze podpořit i reakční teplo a zvýšit tak účinnost řezání. [3, 7, 15]

### 1.3.1. Laserové hořáky

Podle aktivního prostředí se rozlišují tři základní typy laserových hořáků vhodné pro řezání [15, 16]:

- Pevnolátkové - aktivním prostředím je zde homogenní krystal, který je vystaven externímu světelnému výboji. Nejpoužívanější pevnolátkový laser je Nd: YAG. [15, 16]

- Plynové - paprsek zde vzniká po přivedení napětí na elektrody uvnitř trubice s aktivním plynem (argon, neon, helium, apod.). Tyto hořáky dosahují velmi vysokých výkonů, musejí se však chladit a oproti ostatním jsou poměrně nákladné. Pro řezání se nejčastěji používají CO<sub>2</sub> lasery (viz. obr č. 9). [7, 15, 16]



Obr. č. 9 - Schéma deskového CO<sub>2</sub> SLAB laseru [18]

- Polovodičové (laserové diody) - paprsek vznikne v tenké vrstvě mezi dvěma polovodiči. Atomy v této vrstvě mají schopnost pohltnout energii z elektrického proudu a dostat se tak do vyšší energetické hladiny. Při návratu do původní energetické hladiny mají tendenci svou uloženou energii vyzářit. Velmi záleží na použití polovodičů a na přesné tloušťce tenké vrstvy abychom dosáhli monochromatickosti záření. Stále používanější typ laserů. Výhodou je jeho kompaktnost a účinnost. [15, 17]

- Kapalinový laser - aktivním prostředím je zde kapalina, která dosahuje výhod, jak plyných, tak tuhých prostředí. Kapalina může cirkulovat rezonátorem laseru. Používají se anorganické kapaliny jako oxidochlorid fosforečný, halogenidy kovů, oxidochlorid seleničitý s chloridem cíničitým. Aktivním prostředím může např. být několikaprocentní roztok neodymu v kapalině. [7, 15, 16]

### 1.3.2. Způsoby dělení laserem

Řezání laserem může probíhat třemi způsoby [18]:

- Sublimační způsob - při tomto režimu je materiál laserem z místa řezu okamžitě odpařován na kovové páry, které jsou odstraněny asistenčním plynem. Tento způsob zajišťuje velmi kvalitní řez, jelikož se materiál téměř neroztaví. Proces vyžaduje vysokou intenzitu laserového záření a přesné nastavení optiky, která je závislá na tloušťce řezaného materiálu. Málo používaná metoda. [3, 18]
- Tavný způsob - materiál je v místě řezu laserem nataven; tavenina je pak odstraněna asistenčním inertním plynem. Nevyžaduje tak výkonný laser jakou sublimačního způsobu řezání, řezná rychlost je ale nižší. Pokud je jako asistenční plyn použit čistý dusík pod vysokým tlakem, je výsledný řez kvalitní a kovově lesklý. [3, 18]
- Plamenný způsob - laser zahřeje místo řezu na zápalnou teplotu, poté je na toto místo vháněn kyslík, tím dochází k exotermické reakci, obdobné jako u řezání kyslíkem. Použití je omezené na oceli řezatelné kyslíkem, nejčastěji se používá u běžných a konstrukčních ocelí. Metoda nejméně náročná na výkon laseru. Řezné rychlosti jsou větší než u sublimačního procesu (až dvakrát), kvalita řezu však není tak kvalitní a je třeba počítat s větší tepelně ovlivněným pásmem. [3, 18]

## 1.4. Porovnání metod tepelného dělení

V následujících tabulkách č. 7a a 7b jsou ke každému typu tepelného dělení sepsány jejich obecné charakteristické výhody a nevýhody.

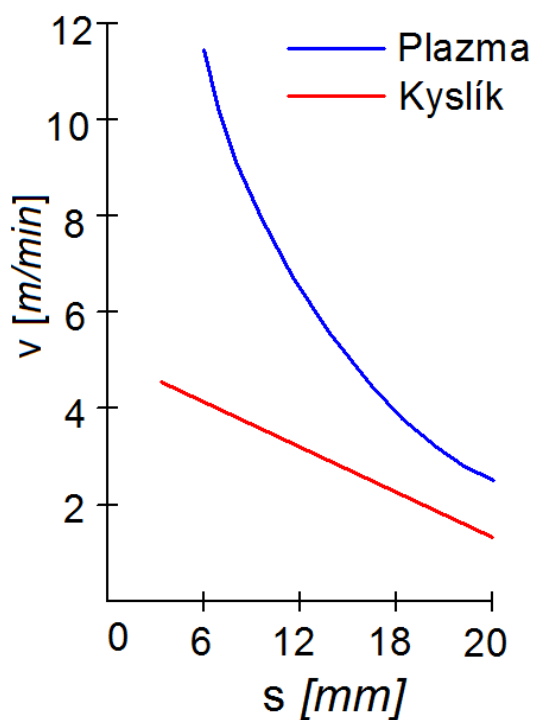
Tabulka č. 7a - Obecné přednosti a nedostatky řezání kyslíkem a plazmou [2, 4, 5, 6, 7, 11, 12]:

Technologie	Výhody	Nevýhody
<b>Řezání kyslíkem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nízké pořizovací náklady</li> <li>• Řezání není omezeno tloušťkou řezaného materiálu</li> <li>• Hladký povrch a čistota řezu</li> <li>• Možnost použití více hořáků současně</li> <li>• Dostupnost zařízení i obsluhy</li> <li>• Možnost řezat i jinak kyslíkem neřezatelné materiály s přidáním prášků</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Málo produktivní (při použití jednoho hořáku)</li> <li>• Zaoblení horní hrany řezu</li> <li>• Výskyt strusky na spodní hraně řezu</li> <li>• Malá rozměrová stálost u opakujících se řezů</li> <li>• Zakřivení v dolním rozměru výpalku</li> <li>• Velká teplem ovlivněná oblast</li> <li>• Vhodné jen pro konstrukční ocel tloušťky nad 5 mm</li> </ul>
<b>Řezání plazmou</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyšší produktivita (řezná rychlost je až 10x větší než u řezání kyslíkem)</li> <li>• Možnost použít více hořáků</li> <li>• Bez alternativy pro řezání vysokolegované oceli a hliníku ve střední a větší tloušťce</li> <li>• Velmi dobře automatizované</li> <li>• Možnost řezání vysoce pevné konstrukční oceli s menším tepelným příkonem</li> <li>• Pro všechny elektricky vodivé materiály</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méně kvalitní hrany - oproti řezání kyslíkem</li> <li>• Omezení řezané tloušťky materiálu - ideální pro ocel o tloušťce od 3 do 40 mm</li> <li>• Vysoké pořizovací náklady - oproti řezání kyslíkem</li> <li>• Omezeno tloušťkou řezaného materiálu (180 mm u suchého, 120 mm pod vodou)</li> <li>• Širší řezná spára</li> <li>• UV záření a hluknost</li> </ul>

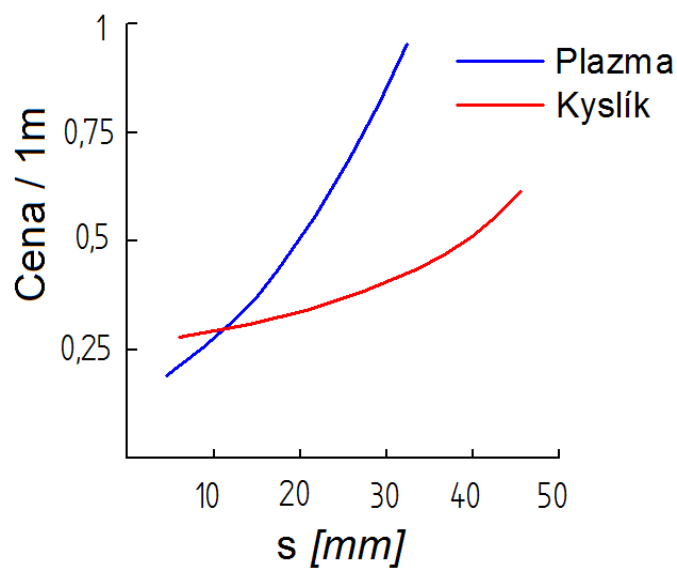
Tabulka č. 7b - Obecné přednosti a nedostatky řezání laserem [2, 3, 5, 15, 19]:

Technologie	Výhody	Nevýhody
<b>Řezání laserem</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velmi přesné, úzké, pravoúhlé a kvalitní řezy, především u slabých a středních tloušťek</li> <li>• Spolehlivost</li> <li>• Velmi dobře automatizované</li> <li>• Vysoká životnost spotřebního materiálu - malé opotřebení nástroje</li> <li>• Možnost řezání složitých a velmi malých tvarů</li> <li>• Malé přivedené teplo - žádné deformace obráběného materiálu</li> <li>• Hospodárné i při malých sériích</li> <li>• Vysoká řezná rychlost, především u tenkých materiálů</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Omezení řezané tloušťky materiálu</li> <li>• Malá rychlost řezání</li> <li>• U CO<sub>2</sub> lasery nelze řezat více hlavami</li> <li>• Vysoké pořizovací náklady</li> <li>• Nutné přesně řídit vzdálenost k řezanému povrchu</li> <li>• Omezení stability paprsku u oceli s normálním obsahem Si a P</li> <li>• Lesknoucí se povrchy snižují stability procesu</li> <li>• Malá účinnost (CO<sub>2</sub> laser max.10%)</li> </ul>

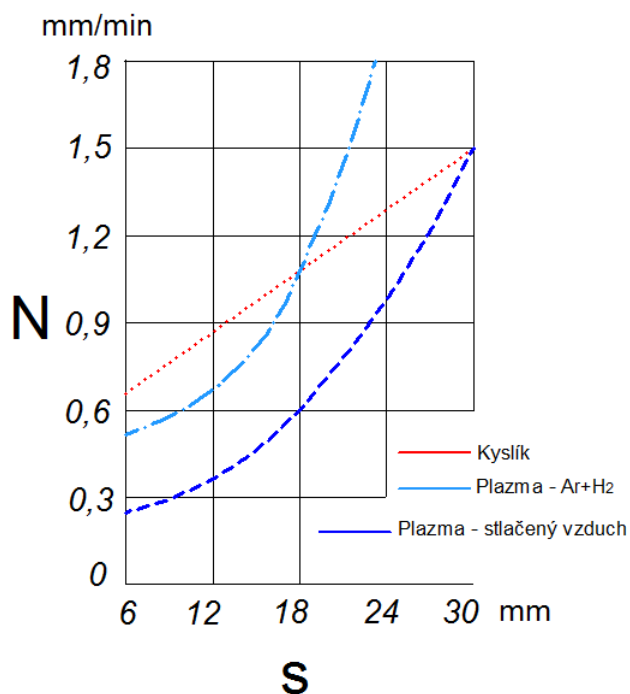
Další porovnání je v podobě několika digramů a grafů zobrazujících specifické difference jednotlivých metod. Nejprve mezi řezáním kyslíkem a plazmou - jedná se o rozdíly v ekonomickém hledisku a rychlostí řezání (viz obr. č. 10, 11, 12, 13). Dále je využito třech diagramů (viz obr. č. 14, 15, 16) ukazujících rozdíly řezné rychlosti v závislosti na tloušťce materiálu a to pro nelegovanou, vysokolegovanou ocel (jen plazma a laser) a hliník (jen plazma a laser). Nakonec je uvedena tabulka (č. 8) srovnávající míru vhodnosti jednotlivých technologií pro specifické materiály a jejich tloušťky.



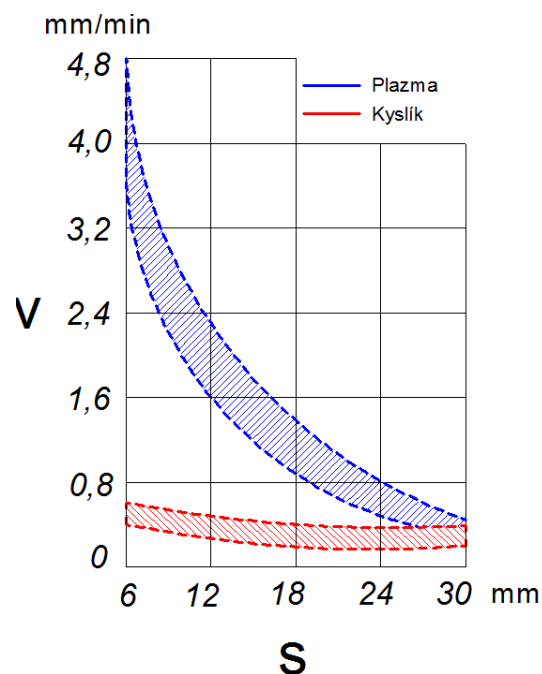
Obr. č. 10 - Závislost mezi rychlostí řezání titanu a jeho tloušťkou [7]



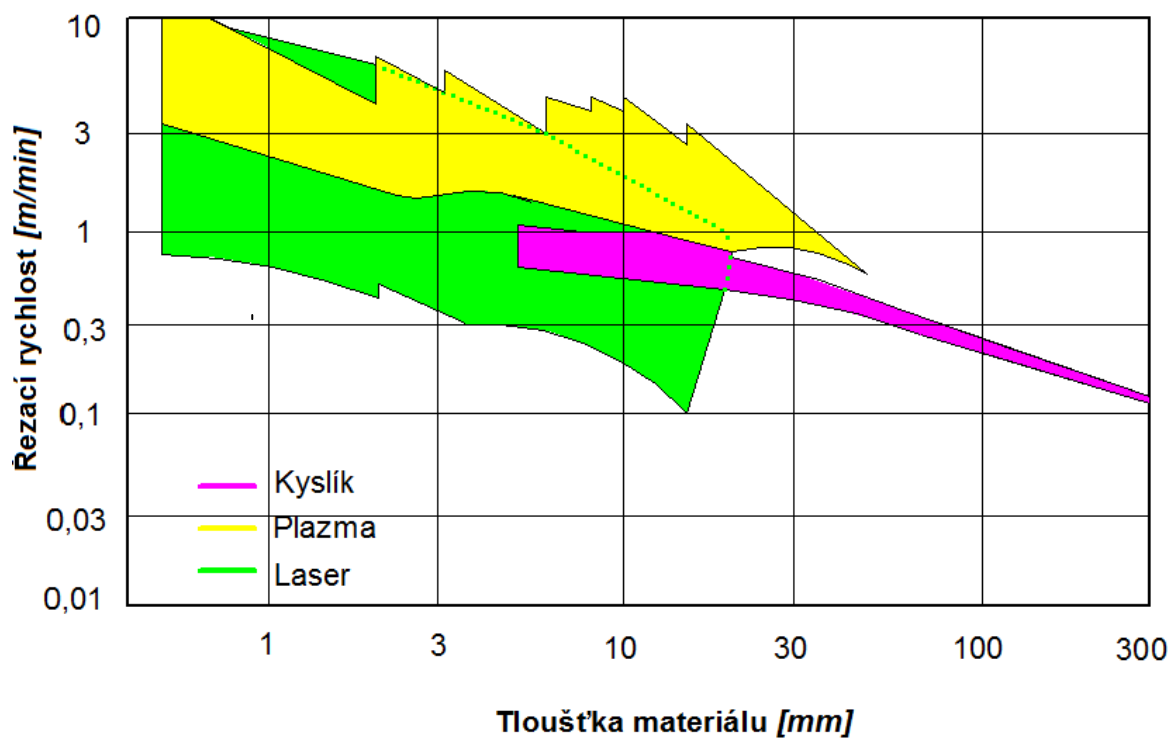
Obr. č. 11 - Ekonomické porovnání dělení plazmou a kyslíkem kyslíku [7]



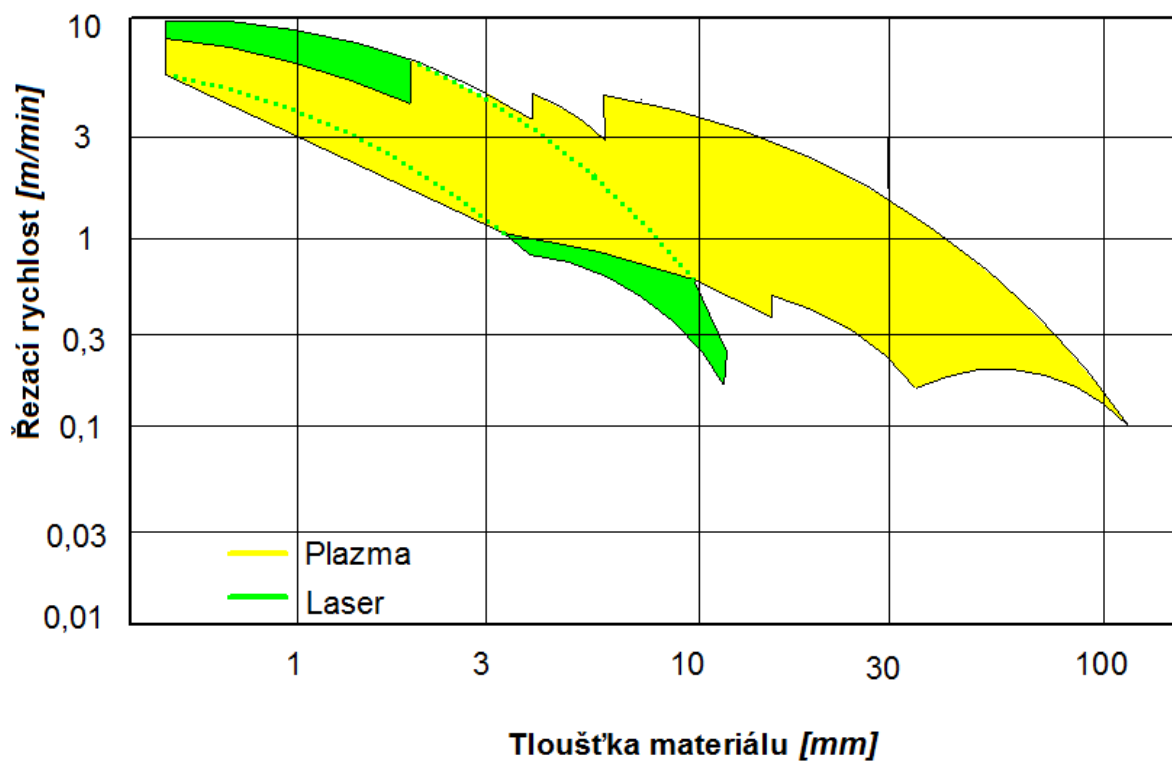
Obr. č. 12 - Závislost provozních nákladů jednotlivých metod tepelného dělení na řezané tloušťce oceli [17]



Obr. č. 13 - Závislost rychlosti řezání kyslíkem a plazmou na řezané tloušťce oceli [17]

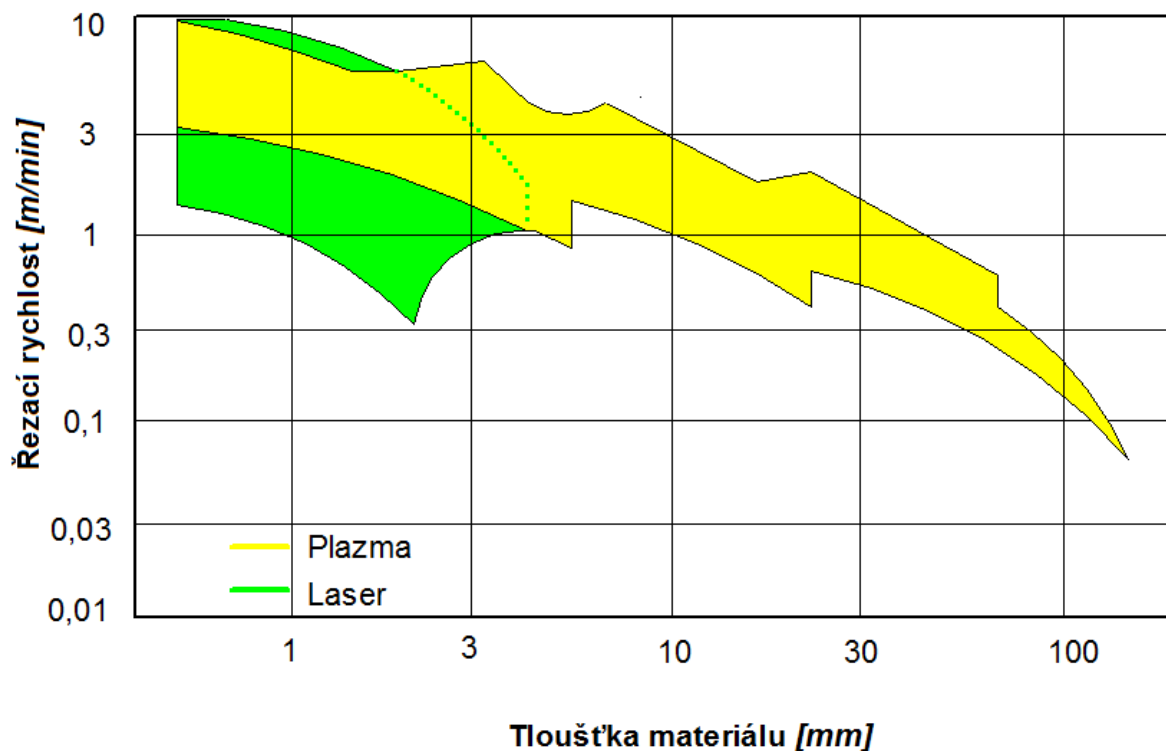


Obr. č. 14 - Graf dosahované řezné rychlosti jednotlivých metod tepelného dělení v závislosti na řezané tloušťce u nelegované oceli [19]



Obr. č. 15 - Graf dosahované řezné rychlosti řezání plazmou a laserem v závislosti na řezané tloušťce u vysokolegované oceli [19]





Obr. č. 16 - Graf dosahované řezné rychlosti řezání plazmou a laserem v závislosti na řezané tloušťce u hliníku [19]

Tabulka č. 8 - Srovnání vhodnosti jednotlivých technologií [5, 20]:

Materiál k řezání	Tolerance	Kyslík	Plazma	Laser
Konstrukční ocel < 5 mm	do $\pm 0,5$ mm	3	1	2
Konstrukční ocel < 5 mm	do $\pm 0,1$ mm	nelze	2	1
Konstrukční ocel 5 - 20 mm	do $\pm 0,5$ mm	2	1	3
Konstrukční ocel 5 - 15 mm	do $\pm 0,2$ mm	2	1	1
Konstrukční ocel 15 - 25 mm	do $\pm 0,5$ mm	2	1	3
Konstrukční ocel 25 - 45 mm		1	1 (O <sub>2</sub> )	ne
Konstrukční ocel > 45 mm		1	2	ne
Vysokolegované oceli		nelze	lze	lze
Hliník		nelze	lze	lze
Umělé hmoty		nelze	nelze	lze

\* (hodnocení 1 = nejvhodnější způsob, 4 = nejméně vhodný způsob)

## 2. Konstrukční oceli

Jedná se oceli patřící do skupiny konstrukčních, které mají v obsahu méně než 2% uhlíku a obsahují další legující prvky. V této skupině jsou oceli rozděleny do skupin podle jejího použití dle normy ČSN EN 10020. Každá skupina může obsahovat nelegované i legované oceli - pokud jsou vhodné pro stejné použití. Skupiny jsou často doplněny o označení jakostní stupně udávající například hodnotu nárazové práce při určité teplotě, způsob dezoxidace apod. Mechanické vlastnosti záleží na tloušťce výrobku. [21, 22]

### 2.1. Označování konstrukčních ocelí

Nejčastěji se používá evropské značení podle použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností dle ČSN EN 10027-1. Používá se série písmen a číslic udávaných bez mezer, na prvním místě je velké písmeno označující primární účel oceli, dále následuje číslo mechanické vlastnosti (záleží na účelu oceli). Další číslice nebo písmena jsou přídatná a doplňují informace o oceli, určují například jakostní stupeň (viz tab. č. 9) a specifikují použití, rozdělují se na první (viz tab. č. 9) a druhou skupinu (viz tab. č. 10 a 11), přičemž druhá skupina může být použita pouze ve spojení s první. U symbolů pro výrobky se před ně umísťuje znaménko + (plus). [21, 22]

Tabulka č. 9 - Označení zaručené hodnoty nárazové práce při různých teplotách [21]:

Nárazová práce [J]	Teplota [°C]						
	+20	0	-20	-30	-40	-50	-60
27	JR	J0	J2	J3	J4	J5	J6
40	KR	K0	K2	K3	K4	K5	K6
60	LR	L0	L2	L3	L4	L5	L6

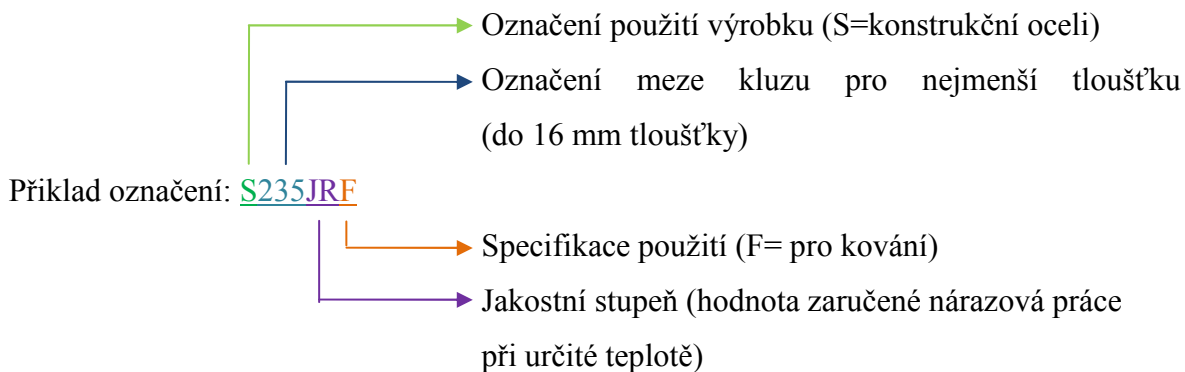
Tabulka č. 10 - Symboly pro druhou skupinu označování konstrukčních ocelí [22]:

Písmeno	Význam
C	Se zvláštní tvářitelností za studena
D	Pro žárové pokovování ponorem
E	Pro smaltování
F	Pro kování
H	Pro duté profily
L	Pro nízké teploty
M	Termomechanicky válcováno
N	Normalizačně žíháno nebo normalizačně válcováno
P	Štětovnice
Q	Zušlechtěno
S	Pro stavbu plavidel
T	Na trubky
W	Odolné proti atmosférické korozi

Tabulka č. 11 - Symboly pro první skupinu označování konstrukčních jemnozrnných ocelí [22]:

Písmeno	Význam
A	Precipitačně vytvrzeno
M	Termomechanicky válcováno
N	Normalizačně žíháno nebo normalizačně válcováno
Q	Zušlechtěno
G	Jiné charakteristiky, pokud jsou potřebné

Chemické značky se, je-li třeba, pro další stanovené prvky uvedou spolu s číslem, které udává desetinásobek střední hodnoty rozsahu předepsaného pro obsahu prvku (zaokrouhleno na 0,1 %). [21, 22]



## 2.2. Oceli pro ocelové konstrukce

### 1) Nelegované jakostní oceli (ČSN EN 10025+A1)

Primárně slouží pro výrobu dlouhých a plochých výrobků, jsou vhodné pro ohýbání, tažení a profilování. Vyrábí se jako ocel uklidněná a to buď tepelným zpracováním nebo normalizačním válcováním. Normou má předepsané minimální hodnoty  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A$  a  $KV$ . Svařitelnost je vhodná pouze pro jakostní stupně (seřazeno od nejvhodnějšího): K2, J2, J0 a JR. [21, 22]

Prvky, které mohou být obsaženy v oceli (C, Mn, Cr, Mo, V, Ni a Cu), s rostoucím množstvím zvyšují prokalitelnost, snižují svařitelnost a při běžném ochlazování nad určitou míru obsahu v oceli dávají za vznik nepopuštěného martenzitu. Hrozí nebezpečí vzniku trhlin. Také je možnost vzniku přesyceného feritu v přechodové vrstvě vlivem teplotního cyklu, ten může způsobit křehkostní lomy. [21, 22]

Tabulka č. 12 - Obvyklí obsah prvků u nelegovaných jakostních ocelí [21]:

Prvek	Obsah prvku v oceli [%]
C	0,17 ÷ 0,25
Mn	max. 1,50 ÷ 1,70
Si	max. 0,60 (pouze u S355)

Norma EN 10025 v této skupině, uvádí celkem tři typy ocelí této skupiny a to S235J0, S275J0, S255J0 (viz tab. č.13).

Tabulka č. 13 - Vlastnosti nelegovaných jakostních ocelí dle normy EN 10025 [21]:

Označ.	C max. [hm. %]	Mn max. [hm. %]	Si max. [hm. %]	S max. [hm. %]	P max. [hm. %]	R <sub>eH</sub> min. [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A min. [%]
S235J0	0,17	1,40	-	0,040	0,040	235	360 510	-
S275J0	0,20	1,50	-	0,040	0,040	275	430 580	14
S355J0	0,20	1,30	0,55	0,040	0,040	355	510 630	-

## 2) Svařitelné jemnozrnné oceli (ČSN EN 10113-1 až 3):

Používá se pro výrobu plechů, pásu a pro dlouhé výrobky válcované za studena. Tyto oceli jsou vhodné pro velmi namáhané svařované konstrukce (mosty, nádrže na vodu, vrata plavebních komor,...). Rozdělují se na čtyři skupiny podle pevnostních vlastností a dále podle toho zda jsou normalizačně (viz tab. č. 14) nebo termomechanicky válcované (viz tab. č. 15). Mikrolegují se vanadem, titanem, hliníkem a niobem - obsah těchto prvků se řídí podle obsahu uhlíku a dusíku a také podle požadovaných výsledných mechanických vlastností. [21, 22]

Tabulka č. 14 - Vlastnosti svařitelných jemnozrnných konstrukčních ocelí normalizačně žíhaných dle normy EN 100113 [21]:

Označ.	C max. [hm. %]	Mn [hm. %]	Si max. [hm. %]	S max. [hm. %]	P max. [hm. %]	Cu max. [hm. %]	Ni max. [hm. %]	V max. [hm. %]	R <sub>eH</sub> min. [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A min. [%]
S275N	0,18	0,50 1,40	0,40	0,030	0,35	0,35	0,30	0,05	275	375 510	24
S355N	0,20	0,90	0,50 1,65	0,030	0,35	0,35	0,50	0,12	355	470 630	22
S420N	0,20	1,00	0,60 1,70	0,030	0,35	0,70	0,80	0,20	420	520 680	19
S460N	0,20	1,00 1,70	0,60	0,030	0,35	0,70	0,80	0,20	460	550 720	17

Tabulka č. 15 - Vlastnosti svařitelných jemnozrnných konstrukčních ocelí tepelně-mechanicky zpracovávaných normy EN 100113 [21]:

Označ.	C max. [hm. %]	Mn max. [hm. %]	Si max. [hm. %]	S max. [hm. %]	P max. [hm. %]	Nb max. [hm. %]	Ni max. [hm. %]	V max. [hm. %]	Al <sub>celk</sub> max. [hm. %]	Ti max. [hm. %]	Mo max. [hm. %]	R <sub>eH</sub> [Mpa]	R <sub>m</sub> [Mpa]	A [%]
S275M	0,13	1,50	0,50	0,030	0,035	0,05	0,30	0,08	0,02	0,05	0,20	275	360 510	24
S355M	0,14	1,60	0,50	0,030	0,035	0,05	0,30	0,10	0,02	0,05	0,20	355	450 610	24
S420M	0,16	1,70	0,50	0,030	0,035	0,05	0,30	0,12	0,02	0,05	0,20	420	500 650	19
S460M	0,16	1,70	0,50	0,030	0,035	0,05	0,45	0,2	0,02	0,05	0,20	460	530 720	17

### 3) Konstrukční oceli odolné vůči atmosférické korozi (ČSN EN 10155)

Vyrábějí se v podobě trubek, plochých nebo dlouhých výrobků a to jako ocel uklidněná, popřípadě s příměsí prvků vážící dusík (Ti, V, Nb, Al). Ocel je díky svým legujícím prvkům (Cr, P, Cu, Ni, Mo,...), které spolu s klimatickými podmínkami dají za vznik ochranné vrstvě oxidů na jejím povrchu. Ocel je pak schopná odolávat atmosférické korozi i bez ochranného nátěru. Pokud je ocel určena pro svařování, uvádí se u ní výrobce uhlíkový ekvivalent. Chemické složení a horní mez kluzu je na následující tabulce. [21, 22]

Tabulka č. 16 - Chemické složení konstrukčních ocelí odolných vůči atmosférické korozi dle normy EN 10155 [21]:

Označ.	C [hm. %]	Mn [hm. %]	Si [hm. %]	P [hm. %]	Cu [hm. %]	S [hm. %]	Cr [hm. %]	R <sub>eH</sub> [Mpa]
S235J2W	0,13	0,20 0,60	0,40	max. 0,040	0,35	0,035	0,40 0,80	235
S355J2WP	0,12	max. 1,00	0,75	0,06- 0,15	0,35	0,035	0,33 1,25	355
S355J0W	0,16	0,50- 1,50	0,50	max. 0,040	0,70	0,040	0,40 0,80	355
S355J2G2W	0,16	0,50- 1,50	0,50	max. 0,035	0,70	0,035	0,40 0,80	355

## Experimentální část

Práce je zaměřena na zjištění příčin nevyhovující kvality řezné plochy výpalků z oceli S355J2+N o tloušťce 260 mm řezaných kyslíkem. Vzniklá nesouměrná hrana, vzhledem k tomu že se musí nejprve opracovat před dalšími operacemi, zvyšuje celkovou náročnost při zhotovování výsledného výrobku, proto je žádoucí aby řezaná hrana byla co nejpřívětivější následnému opracování.

Pro experiment byly vybrány vzorky řezané s různými parametry hořáku, je sledováno jaký dopad mají různé parametry na řezanou hranu za účelem zjištění, který způsobuje její nevyhovující kvalitu. K určení míry kvality je využito několika měřitelných vlastností (skluz, úhlová kolmost, drsnost plochy v různých místech, tvrdost vzorku v různých místech). Pro vizuální posouzení bylo provedeno metalografické šetření.

### 1. Návrh metodiky experimentální práce:

Pro vyhodnocení příčin nekvalitní hrany byl vybrán následující sled operací, viz následující tabulka č. 17.

*Tabulka č. 17 - Sled operací metodiky experimentální práce*

Pořadí	Operace
1	Výběr vzorků k analýze
2	Měření skluzu - n
3	Měření drsnosti - $R_a$ a $R_{z5}$
4	Metalografické šetření
5	Měření úchylky kolmosti - u
6	Měření tvrdosti - HV
7	Vyhodnocení dosažených výsledků



## 2. Metodika provedení experimentální práce

### 2.1. Výběr vzorků

Vzorky jsou z konstrukční oceli S355J2+N a tloušťky 260 mm, které byly řezány ve spolupráci s firmou HMZ Delivery s.r.o., která poskytla informace o jejich chemických a mechanických vlastnostech, jejich řezání a prostředí ve kterém byly děleny. Na experiment bylo vybráno, pro nevyhovující kvalitu řezané plochy, pět vzorků z celkových osmi, vzorky jsou označeny, k zachování přehlednosti, původním číslováním - proto některé číslice chybí. Vzorky jsou označeny: 1, 2, 5, 2B a 3B (viz obr. č. 17). Každý z nich byl řezán za jiných podmínek; měnili se dva hlavní parametry (rychlost řezání a tlak kyslíku). U vzorků 1, 2, 5 byl zvolen předehřev 150°C a to na spodní plochu materiálu. Teplota byla měřena teploměrem UNI-T 302C. Vzorky 2B a 3B jsou řezány bez předehřevu.

Pro řezání vzorků byl použit CNC portálový řezací stroj Combirex SX 3000 od firmy ESAB. Teplota v hale, kde se řezalo, byla 10°C. Nasazená hubice hořáku: IPB 4.450.546 PH 200-300, tryska: 4.450.047 PM 200-25 mm s tlakem 7,5 baru. Úhel sklonu hořáku byl 90°. Pro řezání, jako topný plyn, byla použita kombinace zemního plynu s kyslíkem. Čistota kyslíku byla standardní pro autogenní operace - tedy technický kyslík s čistotou 2,5 (99,5% kyslík).



Obr. č. 17 – Výpalky v pořadí zleva 1, 2, 5, 2B, 3B pálenou plochou nahoru

Údaje o chemickém složení a mechanických vlastnostech oceli poskytovala její objednávka s atestem materiálu (viz příloha A). Pro kontrolu byl proveden chemický rozbor v Testing centru Vítkovice (viz příloha B). Údaje z obou dokumentů jsou zobrazeny v následujících tabulkách č. 18 a 19.

Tabulka č. 18 - Analýzy množství prvku v oceli S355J2+N provedená v Testing centru Vítkovice a množství prvku dle atestu oceli:

Prvek	Hodnota výsledku analýzy [hm. %]	Hodnota dle atestu materiálu [hm. %]
C	0,185	0,170
Mn	1,52	-
Si	0,37	0,360
P	0,016	0,015
S	0,0013	0,002
Cu	0,080	0,100
Ni	0,064	-
Cr	0,067	0,070
Mo	0,029	0,029
V	<0,004	0,003
Ti	<0,002	0,003
W	<0,010	-
Al	0,037	0,030
Nb	0,021	0,070
Co	0,014	-
Zr	<0,002	-
B	0,0004	-
As	0,012	-
Sn	0,005	-
Pb	<0,003	-
Sb	0,005	-
Ca	0,0005	-
Zn	<0,002	-
N	0,0069	0,0055

Tabulka č. 19 – Mechanické vlastnosti oceli S355J2+N podle atestu:

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Rm	544	Mpa
Re	342	Mpa
A	31.0	%

**Výchozí nastavené parametry řezání:**

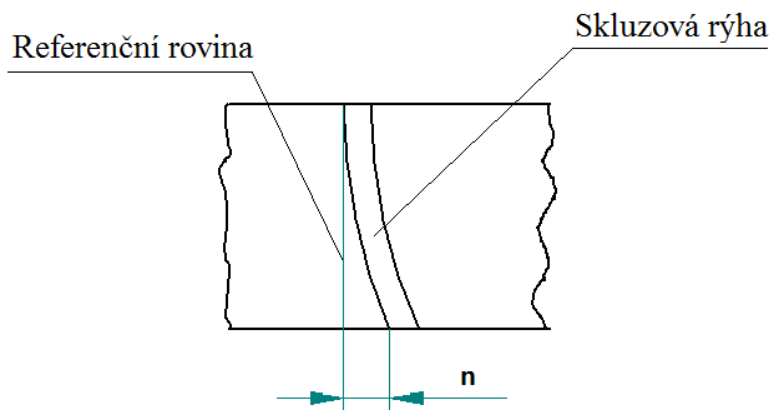
Hořák a řezací CNC stroj byly nastaveny, pro řezání všech vzorků, s neměnnými parametry, měněna byly pouze rychlost posuvu a maximální řezný tlak kyslíku. Výška hořáku se měnila v závislosti na předehřevu (viz tab. č. 20).

*Tabulka č. 20 - Výchozí nastavené parametry pro řezání:*

Parametr	Hodnota	Jednotka
Čas předehřevu 1'	30	s
Čas předehřevu 2'	24	s
Prodloužení vysokého tlaku	0,1	s
Zvednout hořák po dokončení	0,6	s
Čas propalu	5,0	s
Čas zapalování	0,3	s
Zpoždění posuvu	0	s
Tlak plynu při zapalování	0,30	bar
Tlak kyslíku při zapalování	1,39	bar
Nízký tlak topného plynu	0,55	bar
Nízký tlak topného kyslíku	3	bar
Vysoký tlak topného plynu	0,60	bar
Vysoký tlak topného kyslíku	5	bar
Startovací tlak řezného kyslíku	2	bar
Šířka řezu	4,2	mm
Maximální tlak řezacího kyslíku	...	bar
Rychlost posuvu	...	mm/min
Výška hořáku od materiálu (s předehřevem)	10	mm
Výška hořáku od materiálu (bez předehřevu)	13	mm

**2.2. Měření skluzu - n**

Skluzová rýha je charakteristické zbrázdění povrchu řezu u výpalků řezaných kyslíkem (viz obr. č. 18). Skluzových rýhy byly nafoceny fotoaparátem Panasonic DMC-GH4, z nich se pomocí grafického PC programu QuickPHOTO Industrial 3.1 určila referenční rovina, od které se následně odměřil skluz, tak jak popisuje norma ČSN EN ISO 9013.



Obr. č. 18 – Princip měření skluzové rýhy  $n$  [23]

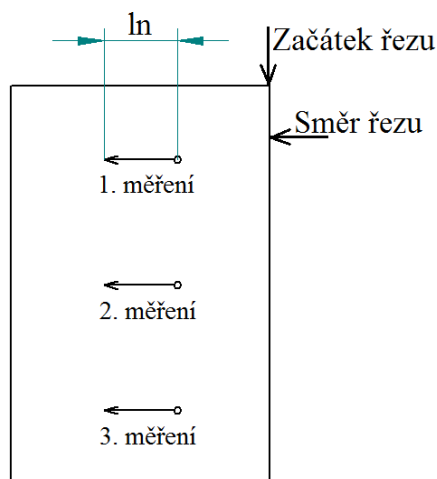
### 2.3. Měření drsnosti - $R_a$ a $R_{z5}$

Vzorky se důkladně očistily od prachu a usazenin, aby nebyl ovlivněn výsledek měření drsnosti. Měření bylo prováděno dotykovým profilometrem značky Mitutoyo (viz obr. č. 19), dle normy ČSN EN ISO 4287.



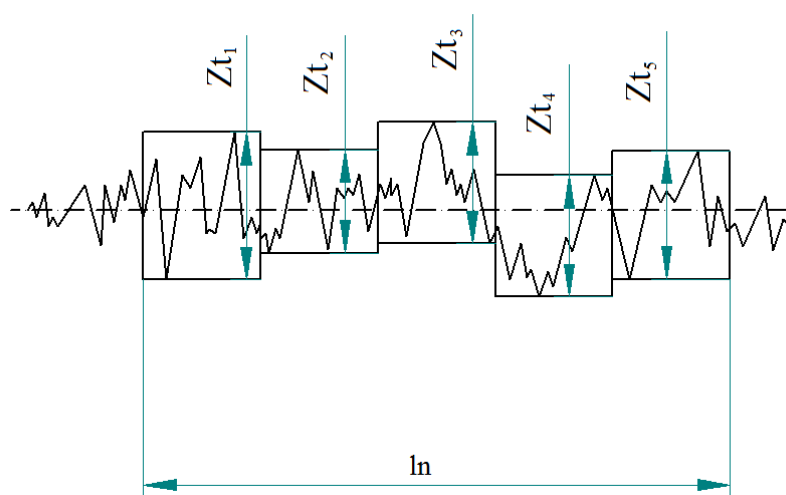
Obr. č. 19 – Dotykový profilometr Surftest 301 [24]

Na každém výpalku se dle normy ČSN EN ISO 9013 provedly tři podélné měření (ve směru řezání hořáku) a to vždy ve třech místech vzorku: v horní části (nahore = počátek řezu), uprostřed a v dolní části (viz obr. č. 20). Z naměřených výsledků se určilo toleranční pole dle ČSN EN ISO 901



Obr. č. 20 – Místa na výpalcích kde se provedlo měření drsnosti

Každé jednotlivé měření se skládalo z pěti měření na vymezené ploše  $l_n = 15$  mm, z nichž se výsledek automaticky zprůměroval na hodnotu  $R_{z5}$  (viz obr. č. 21). Součástí výsledku je navíc i hodnota  $R_a$ .

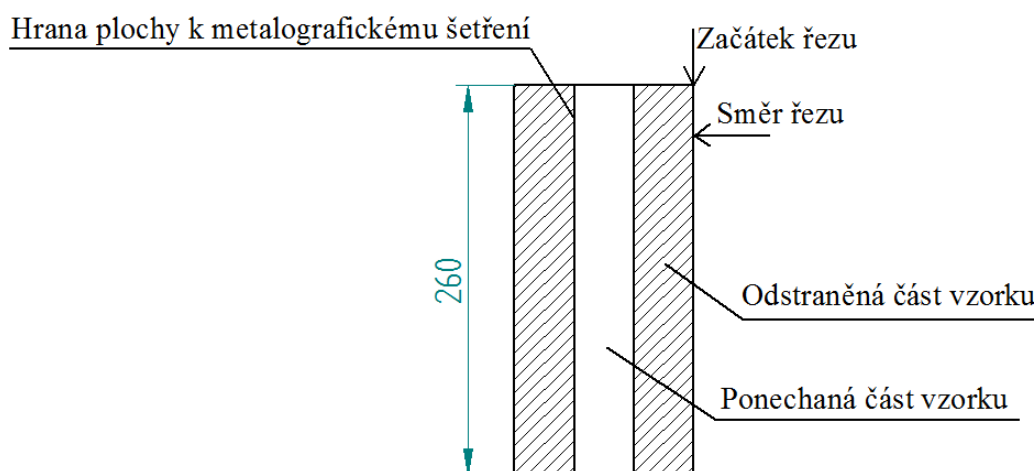


$Z_{t1}$  až  $Z_{t5}$  - charakterizuje jednotlivé prvky profilu,  $l_n$  - měřený úsek (15 mm)

Obr. č. 21 – Princip měření parametru drsnosti  $R_{z5}$  [23]

## 2.4. Metalografické šetrnění

Na vzorcích byla odstraněna část vzorku kolmá k řezu. Vybrousily se rovnoběžné roviny, z nichž jedna byla určena k metalografické zkoušce (viz. obr. č. 22). Vzorky se dále, na posuzované straně, ručně dobrousily jemným brusným papírem nejprve se zrnitostí 120, pak 220 a nakonec 400. Takto připravené vzorky byly ponořeny do roztoku 10% kyseliny dusičné, kde došlo k jejich povrchovému naleptání. Po vytažení byly naleptané vzorky opláchnuty vodou a lihem, a nakonec osušeny proudem vzduchu.



Obr. č. 22 – Schéma úpravy vzorku pro metalografické šetrnění

Takto ošetřené plochy vzorků byly, v měřítku, nafoceny fotoaparátem Nikon Coolpix P7700 umístěném ve stojanu (viz obt. č. 23).

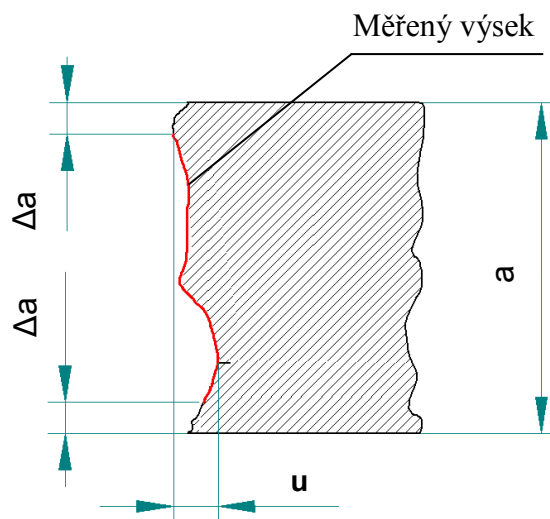


Obr. č. 23 – Pořizování snímku vybroušené a naleptané plochy

## 2.5. Měření odchyšky kolmosti - u

Úchylka kolmosti je vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými přímkami, mezi které je vepsán profil povrchu řezu, přičemž tyto přímky s povrchem řezaného materiálu svírají úhel  $90^\circ$  (viz obr. č. 24). [24]

U výpalků se neměří celá plocha, ale jen výsek od určité vzdálenosti ( $\Delta a$ ) od horní i dolní hrany, kvůli dovolenému natavení řezu. Velikost  $\Delta a$  je závislá na tloušťce řezaného materiálu a určuje ji norma ČSN EN ISO 9013 (viz obr. č. 19 a tab. č. 21). [24]



Obr. č. 24 – Měřený výsek při měření úchylky kolmosti [24]

Tabulka č. 21 - Určení velikosti  $\Delta a$  [23]:

Tloušťka řezu, $a$ [mm]	$\Delta a$ [mm]
$>250 \leq 300$	10

K měření se využilo naskenovaných hran vzorků po makroskopické kontrole, tyto snímky ran se vyhodnotily v grafickém programu QuickPHOTO Industrial 3.1 a změřila se úchylka kolmosti a zní se určilo toleranční pole dle ČSN EN ISO 9013.



## 2.6. Měření tvrdosti - HV

Tvrdot byla určena pomocí tvrdoměru Krautkramer MIC 20 TFT (viz obr. č. 25) pracujícím na základě metody UCI (Ultrasonic Contact Impedance). Jedná se o zkoušku tvrdosti dle Vickerse. Jako sonda byla použita MIC 205 (viz obr. č. 26). Na každé měřené oblasti bylo provedeno deset měření.



Obr. č. 25 - Display tvrdoměru MIC 20



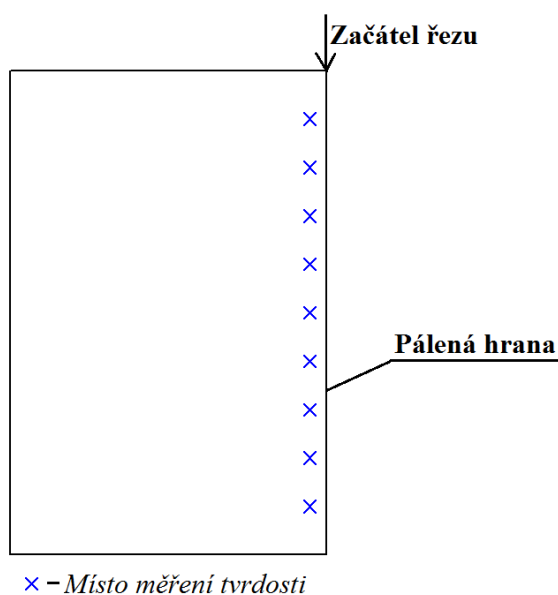
Obr. č. 26 - Sonda tvrdoměru MIC 205

**Byly měřeny tři oblasti:**

- Pálená plocha vzorku, kde bylo vybroušeno místo, aby se zamezil vliv skluzových rýh. Tato plocha byla, navíc ještě, dodatečně třikrát měřena tvrdoměrem MIC 10 jako potvrzení dosažených výsledků.



- Základní materiál na vybroušeném a leptaném povrchu vzorku po metalografickém šetření. Měřicí místa byly náhodně zvoleny v celém rozsahu plochy mimo teplem ovlivněnou oblast.
- Teplem ovlivněná pálená hrana na vybroušeném a leptaném povrchu vzorku po metalografickém šetření. Měřilo se od začátku řezu až k jejímu konci (viz obr. č. 27).



Obr. č. 27 - Měřicí místa v TOO na pálené hraně

## 2.7. Vyhodnocení výsledků

Pro účel možnosti přehledného porovnání výsledků u jednotlivých vzorků byla vypracována tabulka zachycující nastavené parametry hořáku vzorků a výsledky všech měření současně. Dále se vytvořil graf pro vizualizaci výsledků. Následně se vyvodil závěr.

### 3. Výsledky jednotlivých měření

Výsledky jednotlivých měření byly zaznamenány, zvlášť pro každý vzorek, do následujících tabulek, které jsou doplněny příslušnou fotografickou dokumentací. U každého vzorku jsou na začátku zobrazeny nejprve nastavené řezací parametry hořáku, poté je uvedena tabulka zachycující výsledek měření skluzu dle ČSN EN ISO 9013, úchyly kolmosti z ní vycházející určení tolerančního pole dle ČSN EN ISO 9013, drsnosti ve všech třech měřených místech a z ní vycházející určení tolerančního pole dle ČSN EN ISO 9013, nakonec jsou umístěny tabulky tvrdosti ve všech měřených místech. Součástí výsledků je i přiložený metalografický snímek.

U jednotlivých vzorků budou v nastavených parametrech uváděny jen ty parametry, které se měnili, tedy:

- maximální tlak řezacího kyslíku,
- rychlost posuvu,

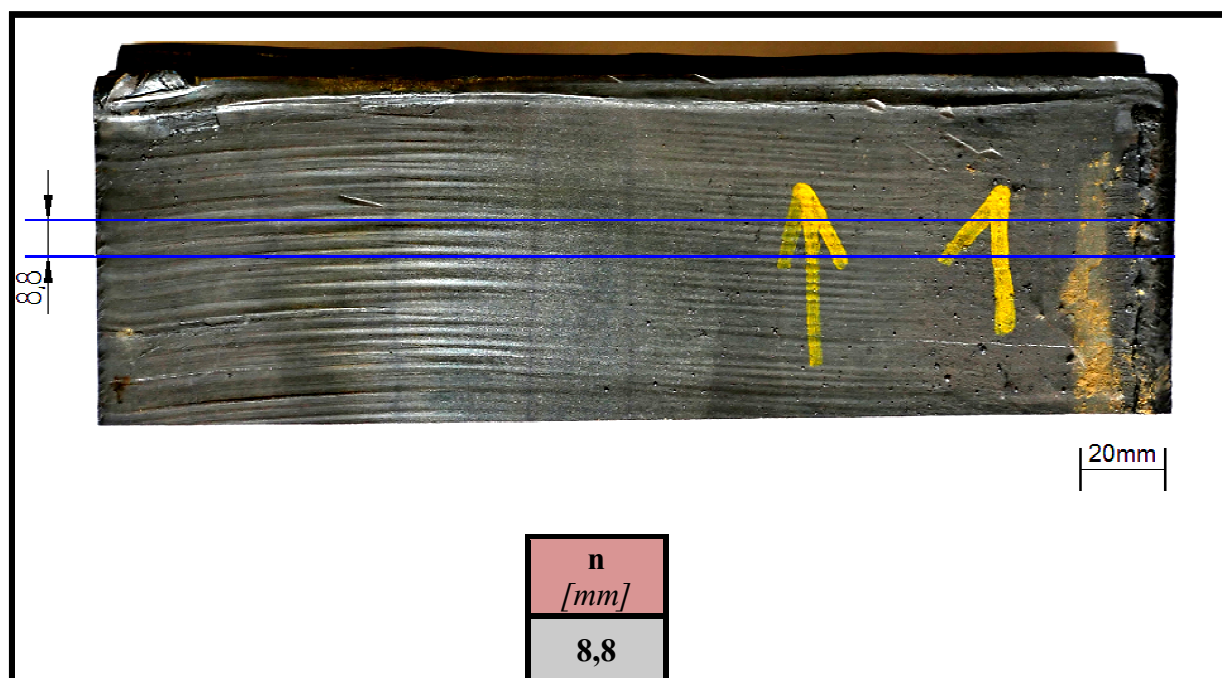
#### Vzorky s předehřevem 150 °C

##### Vzorek č. 1:

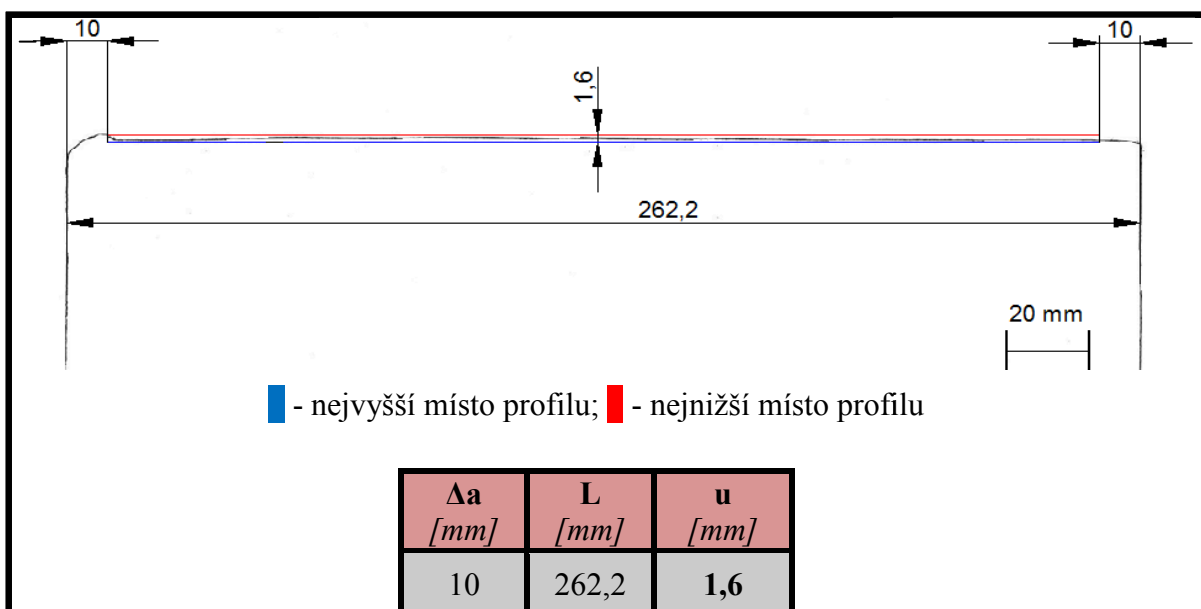
##### Parametry

Tabulka č. 22 - Nastavené parametry pro řezání u vzorku č. 1:

Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální tlak řezacího kyslíku	8	bar
Rychlost posuvu	100	mm/min

**Skluz  $n$** Tabulka č. 23 - Určení skluzu  $n$  na vzorku č. 1:**Úchylka kolmosti  $u$  a určení jejího tolerančního pole**

Tabulka č. 24 - Určení úchylky kolmosti na vzorku č. 1:



Tabulka č. 25 - Určení tol. pole pro úhl. úchylku vzorku č. 1 dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$u$ [mm]	$u^{*})$ [mm]
1	$0,05 + 0,003a$	0,837
<b>2</b>	<b><math>0,15 + 0,007a</math></b>	<b>1,885</b>
3	$0,4 + 0,01a$	2,672
4	$0,8 + 0,02a$	5,294
5	$1,2 + 0,035a$	9,227

<sup>\*)</sup> pro  $u = 1,6$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole

### Drsnost $R_a$ , $R_{z5}$ a určení jejího tolerančního pole

Tabulka č. 26 - Měření drsnosti vzorku č. 1:

Měření	$R_a$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]
1.	13,69	73,08
2.	7,89	43,28
3.	10,46	64,54
Průměr	10,68	60,30

Tabulka č. 27 - Určení tolerančního pole pro  $R_{z5}$  vzorku č. 1 dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}^{*})$ [ $\mu m$ ]
<b>1</b>	<b><math>10 + (0,6a \text{ mm})</math></b>	<b>167,3</b>
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$	249,8
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$	384,6
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$	582,0

<sup>\*)</sup> pro  $a=262,2$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole

**Tvrдост - HV**

Tabulka č. 28 - Výsledek měření tvrdosti na pálené ploše u vzorku č. 1:

Měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 20		Dodatečné měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 10
Měření	HV	HV
1.	465	442
2.	475	424
3.	438	436
4.	435	-
5.	462	-
6.	433	-
7.	457	-
8.	430	-
9.	448	-
10.	435	-
Průměr		432
Směrodatná odchylka výběru		9
Variační koeficient		2,1 %

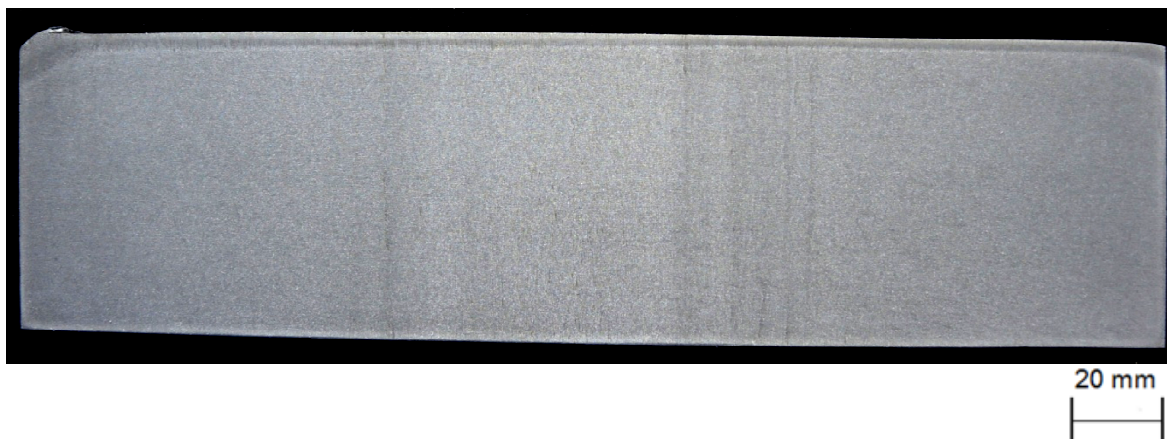
Tabulka č. 29 - Výsledek měření tvrdosti základního materiálu na broušené a leptané ploše u vzorku č. 1:

Měření	HV
1.	136
2.	130
3.	135
4.	147
5.	132
6.	156
7.	154
8.	130
9.	154
10.	151
Průměr	143
Směrodatná odchylka výběru	11
Variační koeficient	7,6%

Tabulka č. 30 - Výsledek měření tvrdosti teplem ovlivněné oblasti na broušené a leptané ploše u vzorku č. 1:

Měření	HV
1.	213
2.	210
3.	214
4.	218
5.	225
6.	225
7.	224
8.	244
9.	238
10.	233
<b>Průměr</b>	<b>224</b>
<b>Směrodatná odchylka výběru</b>	<b>11</b>
<b>Variační koeficient</b>	<b>5,0%</b>

### Metalografický snímek



Obr. č. 28 – Vzorek č. 1 pro metalografické šetření

### Vzorek č. 2:

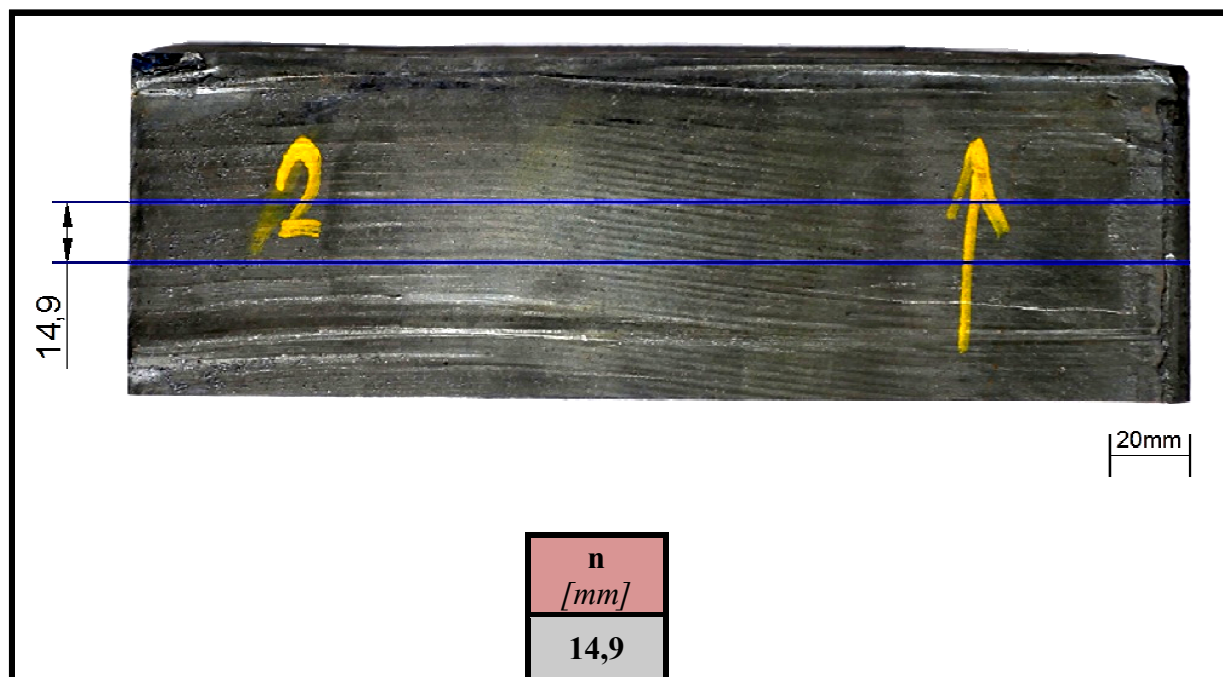
#### Parametry

Tabulka č. 31 - Výchozí nastavené parametry pro řezání u vzorku č. 2:

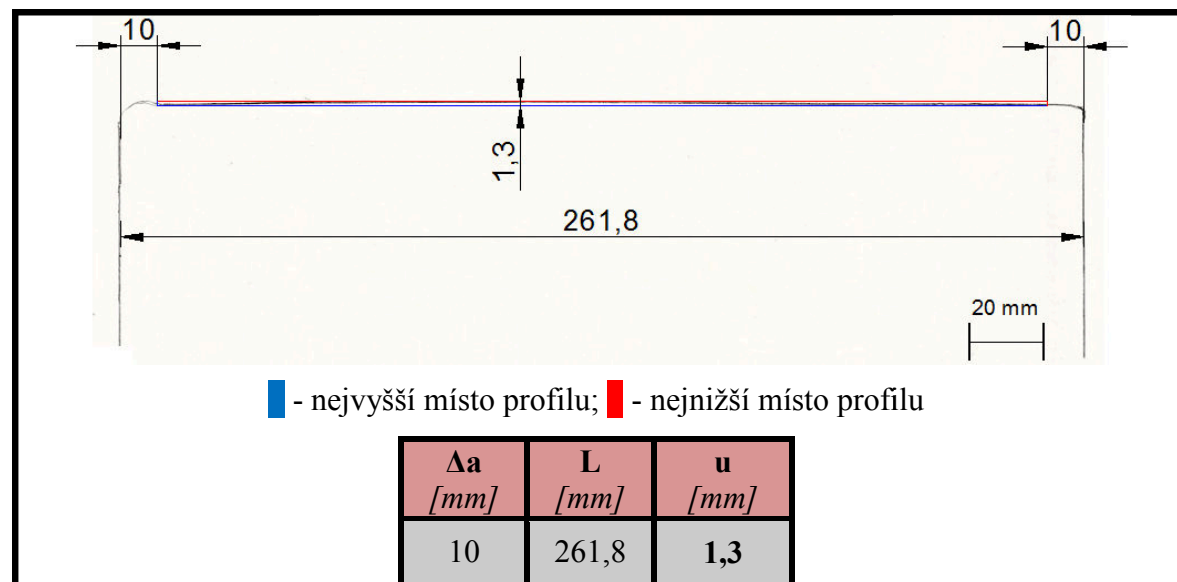
Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální tlak řezacího kyslíku	8	bar
Rychlost posuvu	120	mm/min

**Skluz  $n$** 

Tabulka č. 32 - Určení skluzu  $n$  na vzorku č. 2:

**Úchylka kolmosti  $u$  a určení jejího tolerančního pole**

Tabulka č. 33 - Určení úchylky kolmosti na vzorku č. 2:



Tabulka č. 34 - Určení tol. pole pro úhl. úchylku vzorku č. 2 dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$u$ [mm]	$u^{*)}$ [mm]
1	$0,05 + 0,003a$	0,835
<b>2</b>	<b><math>0,15 + 0,007a</math></b>	<b>1,883</b>
3	$0,4 + 0,01a$	2,668
4	$0,8 + 0,02a$	5,286
5	$1,2 + 0,035a$	9,213

<sup>\*)</sup> pro  $u = 1,3$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; ■ - výsledné toleranční pole

### Drsnost $R_a$ a $R_{z5}$ a určení jejího tolerančního pole

Tabulka č. 35- Měření drsnosti vzorku výpalku č. 2:

Měření	$R_a$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]
1.	8,04	43,54
2.	8,11	38,59
3.	10,96	63,10
Průměr	9,04	48,41

Tabulka č. 36- Určení tolerančního pole pro  $R_{z5}$  vzorku č. 2 dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}^{*)}$ [ $\mu m$ ]
<b>1</b>	<b><math>10 + 0,6a</math> (mm)</b>	<b>167,1</b>
2	$40 + 0,8a$ (mm)	249,4
3	$70 + 1,2a$ (mm)	384,2
4	$110 + 1,8a$ (mm)	581,2

<sup>\*)</sup> pro  $a=261,8$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; ■ - výsledné toleranční pole



**Tvrдост - HV***Tabulka č. 37 - Výsledek měření tvrdosti na pálené ploše u vzorku č. 2:*

Měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 20		Dodatečné měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 10
Měření	HV	HV
1.	292	327
2.	292	331
3.	303	293
4.	298	-
5.	298	-
6.	313	-
7.	330	-
8.	335	-
9.	326	-
10.	296	-
Průměr		317
Směrodatná odchylka výběru		21
Variační koeficient		6,6 %

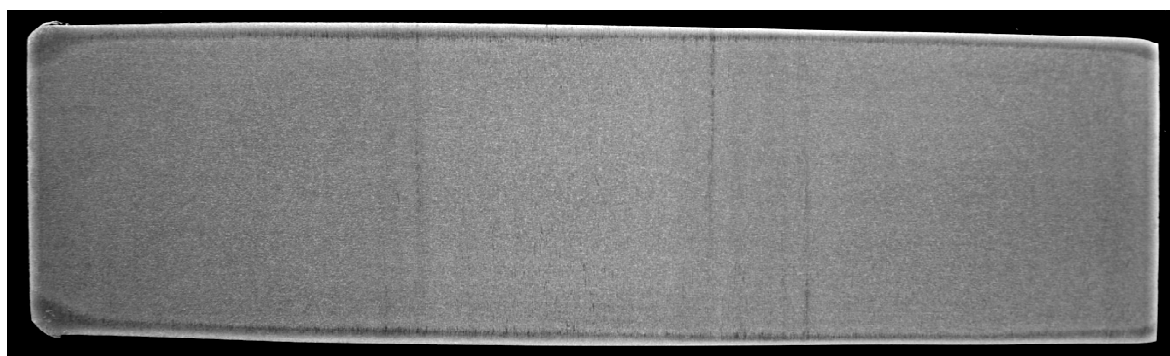
*Tabulka č. 38 - Výsledek měření tvrdosti základního materiálu na broušené a leptané ploše u vzorku č. 2:*

Měření	HV
1.	144
2.	158
3.	146
4.	148
5.	161
6.	145
7.	146
8.	146
9.	163
10.	152
Průměr	151
Směrodatná odchylka výběru	7
Variační koeficient	4,7%

Tabulka č. 39 - Výsledek měření tvrdosti teplem ovlivněné oblasti na broušené a leptané ploše u vzorku č. 2:

Měření	HV
1.	204
2.	202
3.	212
4.	235
5.	234
6.	252
7.	254
8.	280
9.	264
10.	258
<b>Průměr</b>	<b>240</b>
<b>Směrodatná odchylka výběru</b>	<b>28</b>
<b>Variační koeficient</b>	<b>11,1%</b>

### Metalografický snímek



20 mm  
|-----|

Obr. č. 29 – Vzorek č. 2 pro metalografické šetření

### Vzorek č. 5:

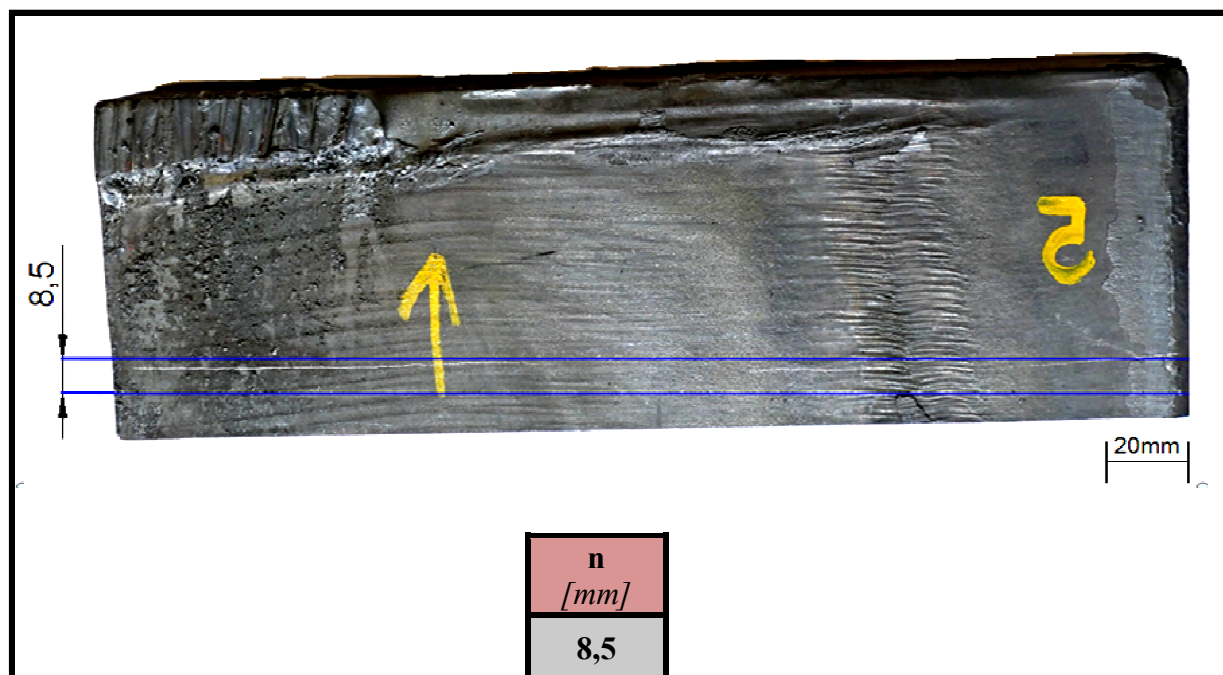
#### Parametry

Tabulka č. 40 - Výchozí nastavené parametry pro řezání u vzorku č. 5:

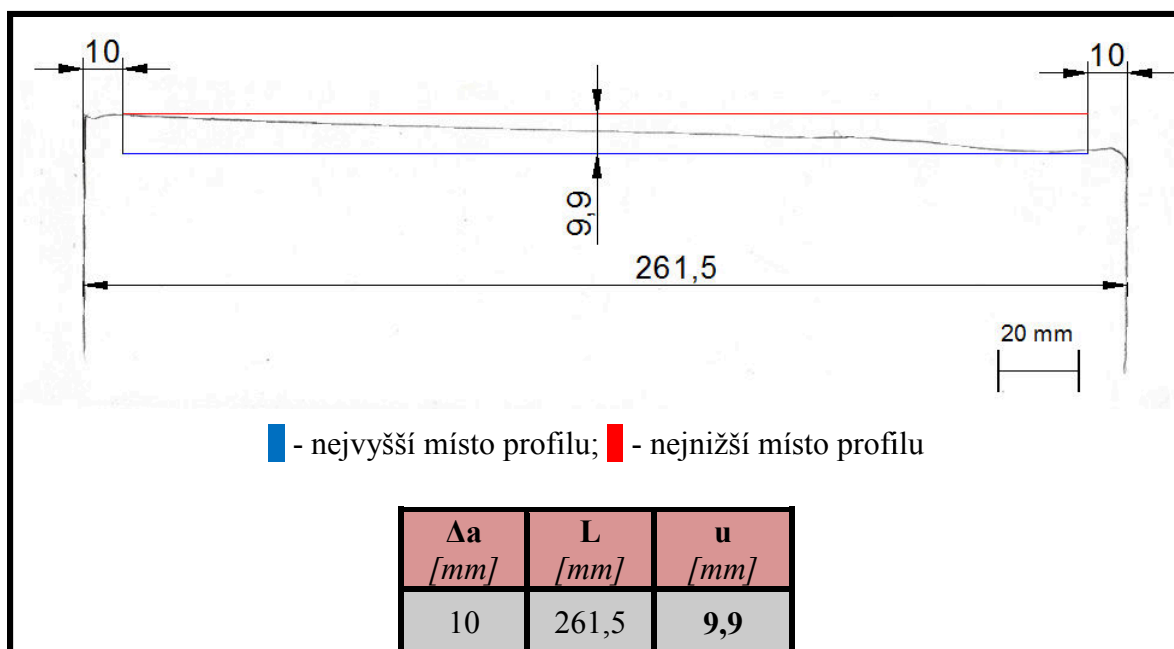
Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální tlak řezacího kyslíku	<b>9,8</b>	<i>bar</i>
Rychlost posuvu	<b>120</b>	<i>mm/min</i>

**Skluz  $n$** 

Tabulka č. 41- Určení skluzu  $n$  na vzorku č. 5:

**Úchylka kolmosti  $u$  a určení jejího tolerančního pole**

Tabulka č. 42 - Určení úchylky kolmosti na vzorku č. 5:



Tabulka č. 43 - Určení tol. pole pro úhl. úchylku vzorku č. 5 dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$u$ [mm]	$u^{*})$ [mm]
1	$0,05 + 0,003a$	0,835
2	$0,15 + 0,007a$	1,881
3	$0,4 + 0,01a$	2,665
4	$0,8 + 0,02a$	5,280
<b>5</b>	<b><math>1,2 + 0,035a</math></b>	<b>9,206</b>

<sup>\*)</sup> pro  $u = 9,9$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole

### Drsnost $R_a$ a $R_{z5}$ a určení jejího tolerančního pole

Tabulka č. 44 - Měření drsnosti vzorku výpalku č. 5:

Měření	$R_a$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]
1.	3,94	26,71
2.	8,56	50,49
3.	nelze*	nelze*
Průměr	4,17	25,73

\*Třetí měření v dolní oblasti nelze provést, jelikož výsledné parametry jsou mimo měřitelné meze (drsnost je příliš velká).

Tabulka č. 45 - Určení tolerančního pole pro  $R_{z5}$  vzorku č. 5 dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}^{*})$ [ $\mu m$ ]
<b>1</b>	<b><math>10 + 0,6a</math> (mm)</b>	<b>166,9</b>
2	$40 + 0,8a$ (mm)	249,2
3	$70 + 1,2a$ (mm)	383,8
4	$110 + 1,8a$ (mm)	580,7

<sup>\*)</sup> pro  $a=261,5$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole

**Tvrdost - HV**

Tabulka č. 46 - Výsledek měření tvrdosti na pálené ploše u vzorku č. 5:

Měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 20		Dodatečné měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 10
Měření	HV	HV
1.	302	369
2.	331	309
3.	333	371
4.	315	-
5.	374	-
6.	358	-
7.	316	-
8.	342	-
9.	354	-
10.	372	-
Průměr	340	350
Směrodatná odchylka výběru	25	35
Variační koeficient	7,3 %	10,1 %

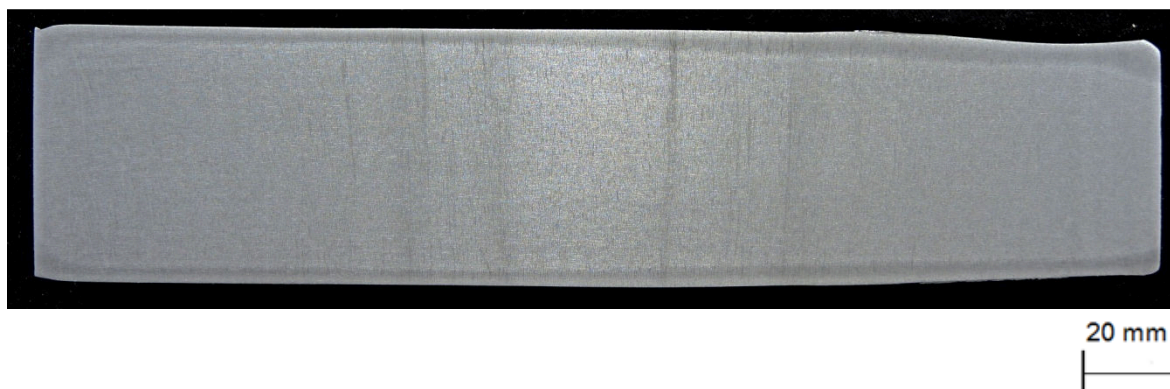
Tabulka č. 47 - Výsledek měření tvrdosti základního materiálu na broušené a leptané ploše u vzorku č. 5:

Měření	HV
1.	205
2.	239
3.	239
4.	209
5.	217
6.	237
7.	274
8.	206
9.	235
10.	286
Průměr	235
Směrodatná odchylka výběru	28
Variační koeficient	11,8%

Tabulka č. 48 - Výsledek měření tvrdosti teplem ovlivněné oblasti na broušené a leptané ploše u vzorku č. 5:

Měření	HV
1.	190
2.	199
3.	214
4.	224
5.	264
6.	234
7.	253
8.	282
9.	284
10.	258
<b>Průměr</b>	<b>240</b>
<b>Směrodatná odchylka výběru</b>	<b>33</b>
<b>Variační koeficient</b>	<b>13,8%</b>

#### Metalografický snímek



Obr. č. 30 – Vzorek č. 5 pro metalografické šetření

#### Vzorky bez předehřevu

##### Vzorek č. 2B:

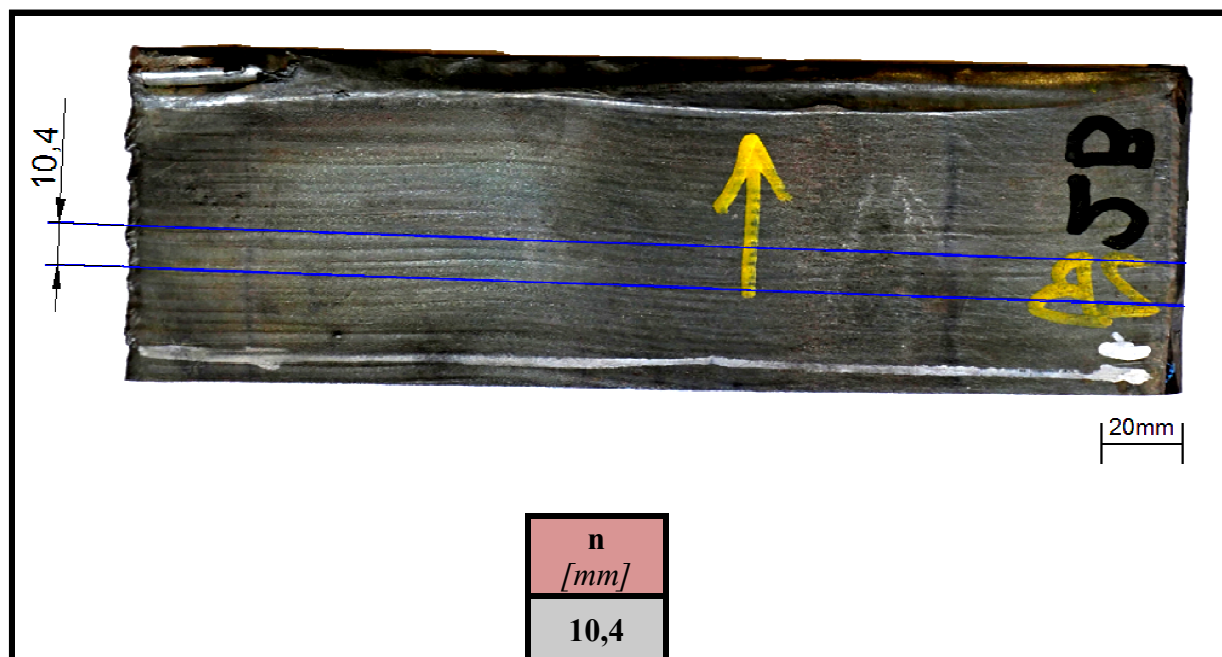
##### Parametry

Tabulka č. 49 - Výchozí nastavené parametry pro řezání u vzorku č. 2B:

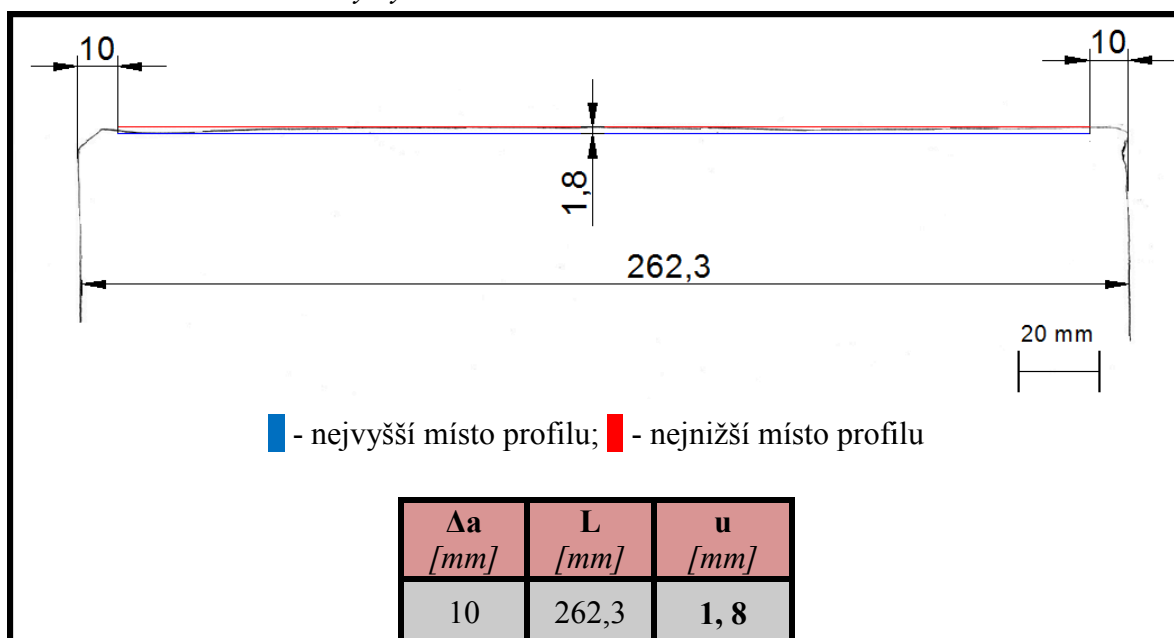
Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální tlak řezacího kyslíku	9	bar
Rychlost posuvu	100	mm/min

**Skluz  $n$** 

Tabulka č. 50 - Určení skluzu  $n$  na vzorku č. 2B:

**Úchylka kolmosti  $u$  a určení jejího tolerančního pole**

Tabulka č. 51 - Určení úchylky kolmosti na vzorku č. 2B:



Tabulka č. 52 - Určení tol. pole pro úhl. úchylku vzorku č. 2B dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$u$ [mm]	$u^{*)}$ [mm]
1	$0,05 + 0,003a$	0,837
<b>2</b>	<b><math>0,15 + 0,007a</math></b>	<b>1,886</b>
3	$0,4 + 0,01a$	2,673
4	$0,8 + 0,02a$	5,296
5	$1,2 + 0,035a$	9,231

<sup>\*)</sup> pro  $u = 1,8$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole

### Drsnost $R_a$ a $R_{z5}$ a určení jejího tolerančního pole

Tabulka č. 53 - Měření drsnosti vzorku výpalku č. 2B:

Měření	$R_a$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]
1.	7,63	50,24
2.	8,06	43,16
3.	14,11	83,45
Průměr	9,93	58,95

Tabulka č. 53 - Určení tolerančního pole pro  $R_{z5}$  vzorku č. 2B dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}^{*)}$ [ $\mu m$ ]
<b>1</b>	<b><math>10 + 0,6a</math> (mm)</b>	<b>167,4</b>
2	$40 + 0,8a$ (mm)	249,8
3	$70 + 1,2a$ (mm)	384,8
4	$110 + 1,8a$ (mm)	582,1

<sup>\*)</sup> pro  $a=262,3$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole



**Tvrдост - HV**

Tabulka č. 54- Výsledek měření tvrdosti na pálené ploše u vzorku č. 2B:

Měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 20		Dodatečné měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 10
Měření	HV	HV
1.	509	535
2.	570	520
3.	575	545
4.	532	-
5.	507	-
6.	556	-
7.	572	-
8.	551	-
9.	550	-
10.	553	-
Průměr		533
Směrodatná odchylka výběru		13
Variační koeficient		2,4 %

Tabulka č. 55 - Výsledek měření tvrdosti základního materiálu na broušené a leptané ploše u vzorku č. 2B:

Měření	HV
1.	159
2.	164
3.	133
4.	142
5.	144
6.	154
7.	145
8.	167
9.	135
10.	150
Průměr	149
Směrodatná odchylka výběru	11
Variační koeficient	7,4%

Tabulka č. 56 - Výsledek měření tvrdosti teplem ovlivněné oblasti na broušené a leptané ploše u vzorku č. 2B:

Měření	HV
1.	211
2.	209
3.	222
4.	225
5.	255
6.	239
7.	240
8.	238
9.	211
10.	202
<b>Průměr</b>	<b>225</b>
<b>Směrodatná odchylka výběru</b>	<b>17</b>
<b>Variační koeficient</b>	<b>7,3%</b>

### Metalografický snímek



Obr. č. 31 – Vzorek č. 2B pro metalografické šetření

### Vzorek č. 3B

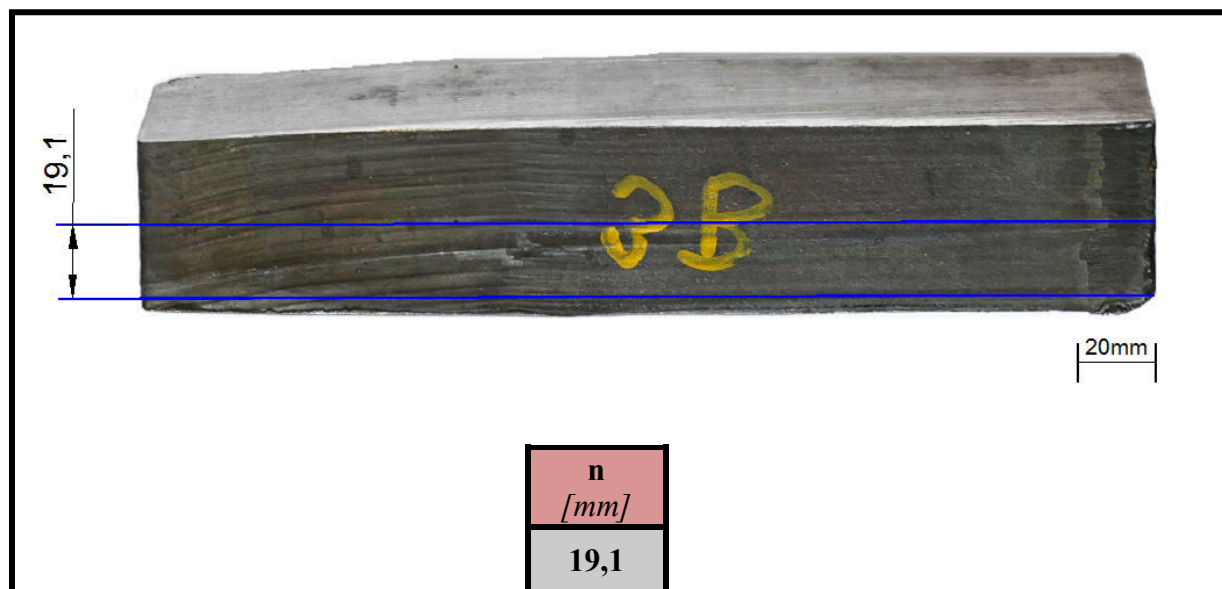
#### Parametry

Tabulka č. 56 - Výchozí nastavené parametry pro řezání u vzorku č. 3B:

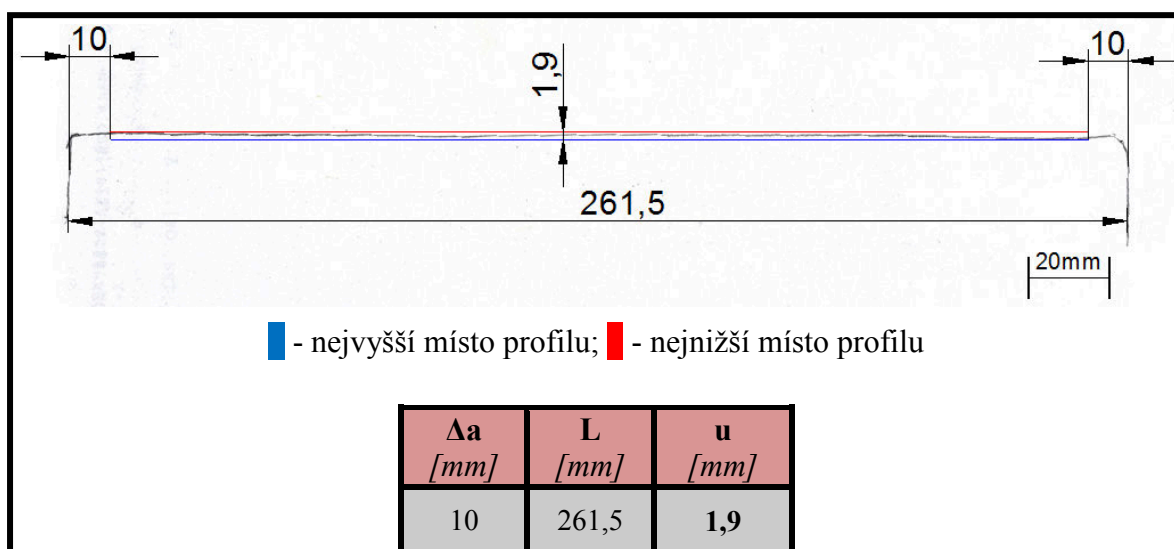
Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální tlak řezacího kyslíku	<b>8,8</b>	<i>bar</i>
Rychlost posuvu	<b>100</b>	<i>mm/min</i>

**Skluz  $n$** 

Tabulka č. 57 - Určení skluzu  $n$  na vzorku č. 3B:

**Úchylka kolmosti  $u$  a určení jejího tolerančního pole**

Tabulka č. 58 - Určení úchylky kolmosti na vzorku č. 3B:



Tabulka č. 59- Určení tol. pole pro úhl. úchylku vzorku č. 3B dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$u$ [mm]	$u^{*)}$ [mm]
1	0,05 + 0,003a	0,835
2	0,15 + 0,007a	1,881
<b>3</b>	<b>0,4 + 0,01a</b>	<b>2,665</b>
4	0,8 + 0,02a	5,280
5	1,2 + 0,035a	9,206

<sup>\*)</sup> pro  $u = 1,9$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole

### Drsnost $R_a$ a $R_{z5}$ a určení jejího tolerančního pole

Tabulka č. 60 - Měření drsnosti vzorku výpalku č. 3B:

Měření	$R_a$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]
1.	16,82	94,60
2.	14,72	73,35
3.	11,60	66,02
Průměr	14,38	77,99

Tabulka č. 61 - Určení tolerančního pole pro  $R_{z5}$  vzorku č. 3B dle ČSN EN ISO 9013:

Toleranční pole	$R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	$R_{z5}^{*)}$ [ $\mu m$ ]
<b>1</b>	<b>10 + 0,6a (mm)</b>	<b>166,9</b>
2	40 + 0,8a (mm)	249,2
3	70 + 1,2a (mm)	383,8
4	110 + 1,8a (mm)	580,7

<sup>\*)</sup> pro  $a=261,5$  mm;  $a$  - tloušťka řezaného výpalku; **■** - výsledné toleranční pole

**Tvrдост - HV***Tabulka č. 62 - Výsledek měření tvrdosti na pálené ploše u vzorku č. 3B:*

Měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 20		Dodatečné měření tvrdosti tvrdoměrem MIC 10
Měření	HV	HV
1.	500	497
2.	552	521
3.	499	511
4.	490	-
5.	479	-
6.	545	-
7.	566	-
8.	485	-
9.	519	-
10.	505	-
Průměr		510
Směrodatná odchylka výběru		12
Variační koeficient		2,3 %

*Tabulka č. 63 - Výsledek měření tvrdosti základního materiálu na broušené a leptané ploše u vzorku č. 3B:*

Měření	HV
1.	148
2.	149
3.	143
4.	143
5.	169
6.	164
7.	156
8.	162
9.	175
10.	166
Průměr	158
Směrodatná odchylka výběru	11
Variační koeficient	6,9 %

Tabulka č. 64 - Výsledek měření tvrdosti teplem ovlivněné oblasti na broušené a leptané ploše u vzorku č. 3B:

Měření	HV
1.	200
2.	198
3.	223
4.	202
5.	237
6.	246
7.	240
8.	260
9.	273
10.	272
Průměr	235
Směrodatná odchylka výběru	26
Variační koeficient	11,0 %

#### Metalografický snímek



Obr. č. 32 – Vzorek č. 3B pro metalografické šetření

#### 4. Vyhodnocení dosažených výsledků

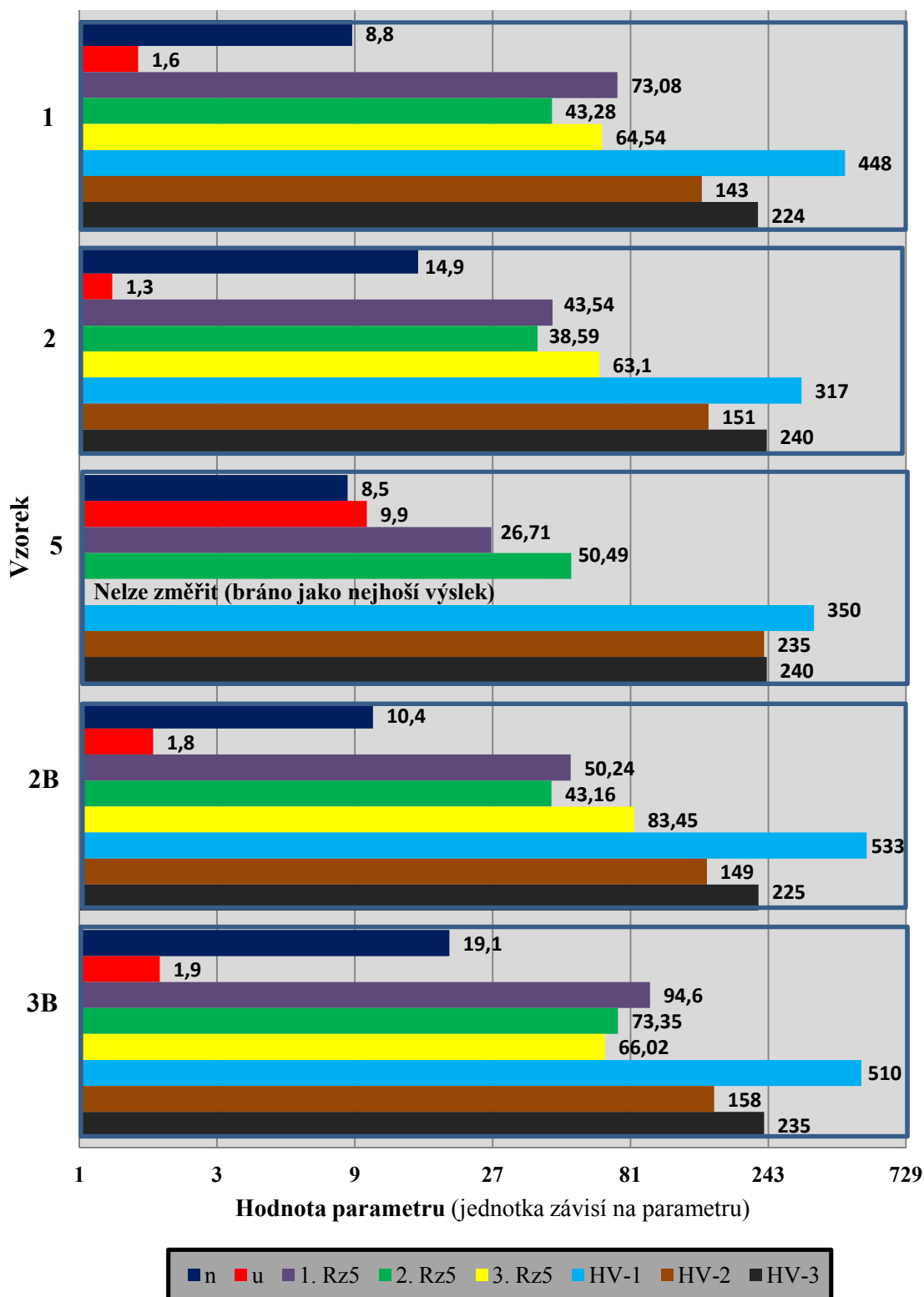
Dosažené výsledky všech měření ke každému vzorku byly zařazeny do následující tabulky č. 65.

Tabulka č. 65 - Porovnání dosažených výsledků

Parametr	Vzorek				
	1	2	5	2B	3B
Max. tlak řezacího kyslíku [bar]	8	8	9,8	9	8,8
Rychlost posuvu [mm/min]	100	120	120	100	100
n [mm]	8,8	14,9	8,5	10,4	19,1
u [mm]	1,6	1,3	9,9	1,8	1,9
1. $R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	73,08	43,54	26,71	50,24	94,60
2. $R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	43,28	38,59	50,49	43,16	73,35
3. $R_{z5}$ [ $\mu m$ ]	64,54	63,10	nelze	83,45	66,02
HV-1	448	317	350	533	510
HV-2	143	151	235	149	158
HV-3	224	240	240	225	235

1.  $R_{z5}$  - první místo měření; 2.  $R_{z5}$  - druhé místo měření; 3.  $R_{z5}$  - třetí místo měření;  
 HV-1 - tvrdost měřená na pálené ploše; HV-2 - tvrdost měřená na broušeném a leptaném  
 základním materiálu; HV-3 - tvrdost měřená na broušené a leptané TOO

Pro vizualizaci výsledků byl vypracován následující graf srovnávající výsledky naměřených parametrů u jednotlivých vzorků (viz obr. č. 33).



Obr. č. 33 - Graf porovnání výsledných hodnot pálených vzorků



## Skluzové rýhy

Skluzové rýhy byly nejpříjemnější v případě předeřátého vzorku č. 5, tedy malý posuv (120 mm/min) a nízký řezný tlak (9,8 barů). Snížením tlaku (při zachování posuvu), jako u vzorku č. 2, mělo neblahý vliv na skluz rýh. Pokud se ale, se snížením tlaku, současně snížil i posuv (viz vzorek č. 1) skluz rýh zůstal prakticky stejný a proto se ve výsledku musí oba parametry zvyšovat nebo snižovat současně. Vzorky s vynechaným předeřevem vykazovaly skluz rýh větší o to, čím byl menší tlak, který měl v tomto případě velký význam (0,2 baru zapříčiní markantní rozdíl), oproti vzorkům s předeřevem byl skluz u vzorků bez předeřevu (ovšem s vyšším tlakem) jen nepříliš výrazně zhoršen.

## Úchylka kolmosti

Nejlepší výsledek dosáhl předeřatý vzorek č. 2 s nízkým tlakem (8 barů) a vysokým řezným posuvem (120 mm/min). Naopak nejhoršího výsledku dosahoval vzorek s největším tlakem (9,8 barů), který měl oproti ostatním vzorkům mnohem větší hodnotu úchylnosti kolmosti. Z výsledků je patrné že pokud se snížil posuv (a tlak zůstal stejný) výsledkem byl negativní dopad na úchylku kolmosti (viz vzorek č. 1) a pokud se zvýšil tlak kyslíku (a posuv zůstal stejný) byl výsledkem opět nárůst úchylnosti (viz vzorek č. 3). Vynecháním předeřevu získáme negativních výsledků úchylnosti kolmosti.

Toleranční pole dle ČSN EN ISO 9013 vyšlo u vzorků 1, 2 a 2B v kategorii 2, vzorek č. 2B v kategorii 3 a nakonec vzorek č. 5 se svou velmi vysokou úchylností kolmosti byl zařazen do nejhorší kategorie 5.

## Drsnost

Souhrnně (brány v potaz všechny měřicí oblasti dohromady) dosahoval nejnižších hodnot drsnosti vzorek č. 2 s nízkým tlakem (8 barů) a vysokou řeznou rychlostí (120 mm/min). Nejhorší dopadl vzorek bez předeřevu č. 3B (tlak 8,8 barů; posuv 100 mm/min). Ostatní vzorky dopadly s výsledky nepříliš rozdílnými v oblastech mezi vzorkem č. 2 a 5.

Obecně platilo že nejnižší drsnost byla uprostřed vzorků (oblast označená jako 2.  $R_{z5}$ ), o něco hrubší byla horní oblast vzorků (1.  $R_{z5}$ ) a nejméně kvalitní, po stránce drsnosti, byla dolní oblast vzorků (3.  $R_{z5}$ ). viz výsledky jednotlivých oblastí dále.

Toleranční pole dle ČSN EN ISO 9013 vyšlo u všech vzorků v nejlepší kategorii 1.

***Drsnost v horní části vzorku (1.  $R_{z5}$ )***

Nejlépe dopadl vzorek č. 5 s předehřevem, vysokým tlakem (9,8 barů) i posuvem (120 mm/min). Vzorek č. 2 se vlivem nižšího tlaku (8 barů), ale při stejném posuvu (120 mm/min), vykazoval patrné zhoršení drsnosti (hodnota byla téměř dvojnásobná než u vzorku č. 5). Pokud se s tlakem snížil i posuv jako u vzorku č. 1 (na 100 mm/min) byl dopad na drsnost ještě výraznější (téměř trojnásobná hodnota než u vzorku č. 5). U vynechaného předehřevu je vliv tlaku markantní. Vzorek č. 2B (tlak 9 barů, posuv 100 mm/min) dosahuje hodnot obdobných jako u vzorku s předehřevem č. 2B (8 barů, 120 mm/min), avšak pokud se snížil tlak jako u vzorku č. 3B (tlak 8,8 barů) dosahovala tvrdost nejhorších výsledků (téměř dvojnásobný oproti vzorku 2B).

***Drsnost ve střední části vzorku (2.  $R_{z5}$ )***

U vzorku č. 2 (tlak 8 barů; posuv 120 mm/min) bylo dosaženo nejmenší drsnosti, u vzorku č. 1 se snížením posuvu (na 100 mm/min) a zachováním tlaku drsnost zhoršila jen nepatrně a dosahovala téměř stejných hodnot jako vzorek bez předehřevu č. 2B (tlak 9 barů; posuv 100 mm/min). Zvýšením tlaku (na 9,8 barů) u vzorku č. 5 se dosáhlo pouze negativního dopadu na drsnost. Pokud vynecháme předehřev, musí být řezný tlak vyšší, jinak dojde k značnému zhoršení drsnosti.

***Drsnost v dolní části vzorku (3.  $R_{z5}$ )***

U vzorků č. 1 a 2 u kterých byl stejný tlak (8 barů) ale rozdílný posuv vykazovali stejné výsledky. Pokud se však zvýšil tlak byla řezaná plocha takové drsnosti že byla mimo měřitelné meze a nebylo možné ji změřit (viz vzorek č. 5). Vynecháním předehřevu lze dosáhnout obdobných výsledků jako u vzorků s předehřevem, avšak s nižším tlakem drsnost klesá.

## **Tvrдост**

Souhrnně (brány v potaz všechny měřící místa dohromady) dosahoval nejnižší tvrdost vzorek s předehřevem č. 2 s nízkým tlakem (8 barů) a vysokou řeznou rychlostí (120 mm/min). Ukázalo se že předehřev zvyšuje tvrdost, jelikož nejhůře dopadly vzorky bez předehřevu č. 2B a 3B.

Největší tvrdosti dosahovaly měření na pálené ploše a nejmenší na broušeném a leptaném základním materiálu. Měření v teplem ovlivněné oblasti vykazovalo vzrůstající hodnotu tvrdosti společně s rostoucí hloubkou řezu.

### ***Tvrдост měřená na pálené ploše (HV-1)***

Nejtvrdší oblast vzorků. Nejméně tvrdé byly vzorky č. 2 a 5 s vysokým posuvem (120 mm/min). Snížením posuvu se tvrdost zvýší (viz vzorek č. 1). Vynecháním předehřevu se docílí zvýšení tvrdosti, změna tlaku toto zvýšení ovlivní jen nepatrně.

### ***Tvrдост měřená na broušeném a leptaném základním materiálu (HV-2)***

Vzorek č. 5 s nejvyšším tlakem (9,8 barů) i posuvem (120 mm/min) byl nejtvrdší. Všechny ostatní vzorky, vlivem nižšího tlaku, však dosáhli tvrdosti znatelně nižší a výsledky u nich byly takřka totožné. Předehřev má na tvrdost v tomto místě zanedbatelný vliv.

### ***Tvrдост měřená na broušené a leptané TOO (HV-3)***

Zprůměrované výsledky z celé šířky řezané tloušťky se u všech vzorků lišily jen nepatrně. Je však patrný jistý vliv posuvu na tvrdost - vzorky s posuvem 120 mm/min mají tvrdost o něco vyšší než s posuvem 100 mm/min. Předehřev má na tvrdost v tomto místě zanedbatelný vliv.

Dále je u všech vzorků znatelný posun tvrdosti společně s hloubkou řezu (na začátku je tvrdost nejmenší a ke konci největší)

## Závěr

Teoretická část byla zaměřena na popis technologie tepelného dělení: byly vyjmenovány jednotlivé metody, objasněny jejich principy, popsány řezací zařízení a spotřební materiál, použitelnost, výhody a nevýhody. Dále byly rozebrány konstrukční oceli, byl vysvětlen princip jejich označování, jejich rozdělení, nejčastější využití v praxi a chemické i mechanické vlastnosti jednotlivých typů ocelí.

Experimentální část měla za úkol zjistit proč konstrukční ocel S355 šířky 260 mm, která je dělena kyslíkem, má kvalitou nevyhovující řeznou hranu. Za tímto účelem bylo z této oceli vyřezáno pět vzorků, přičemž každý byl řezán s rozdílnými parametry - maximální tlak řezacího kyslíku, rychlost posuvu a předehřev. Na vzorcích se sledovaly měřitelné vlastnosti plochy a to: skluzové rýhy, úchylka kolmosti, drsnost ve třech místech vzorku (horní, střední a dolní části) a tvrdost měřená na třech plochách (na pálené ploše, broušené a leptané ploše a na pálené hraně). Výsledky měření se porovnaly a skrze ně se vyvodily příčiny nevyhovující řezné hrany.

Výsledek experimentální práce:

Jako nejkvalitnější byl vyhodnocen vzorek s předehřevem č. 2 (tlak 8 barů; posuv 120 mm/min) vzhledem k tomu že dosahoval nejpříznivějších hodnot ve všech kategoriích krom skluzu rýh a drsnosti v horní části řezané plochy, kde parametry dosahovali oproti ostatním vzorkům průměrných hodnot. Druhým kvalitativně nejlepším byl vyhodnocen vzorek s předehřevem č. 1 (tlak 8 barů; posuv 100 mm/min), který měl sice oproti vzorku č. 2 přijatelnější skluz rýh avšak v parametru úchylky kolmosti, drsnosti v horní oblasti vzorku a tvrdosti pálené plochy byl výrazně horší. Vzorek s předehřevem č. 5 (tlak 9,8 barů; posuv 120 mm/min) společně se vzorkem bez předehřevu č. 2B (tlak 9 barů; posuv 100 mm/min), ač oba měly dobrý výsledek v parametrech skluzu rýh a tvrdosti na pálené hraně a uspokojivý výsledek v drsnosti ve střední části vzorku, byli vyhodnoceny jako podprůměrné, díky nejhorším (hlavně vzorek č. 5) výsledkům v parametrech úchylky kolmosti, drsnosti v dolní části vzorku, tvrdosti na pálené ploše (vzorek č. 2B) a tvrdosti na broušené a leptané ploše (vzorek č. 5). Jako nejméně kvalitní byl určen vzorek bez předehřevu č. 3B (tlak 8,8 barů; posuv 100 mm/min), skrze nejhorší výsledky všech parametrů, kromě drsnosti v dolní části vzorku a tvrdosti na broušeném a leptaném povrchu a na pálené hraně. Příčinou nevyhovující hrany tak byl nejčastěji příliš vysoký tlak, nízký posuv a absence předehřevu. Uvedené výsledky byly ihned aplikovány v praxi.

## Seznam použité literatury:

- [1] High-performance thermal cutting of metals. *B&R CORPORATE* [online]. Eggelsberg: B&R Corporate, ©2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/en/company/customer-magazine/2013/201311/high-performance-thermal-cutting-of-metals/>
- [2] KUNCIPÁL, J. *Svařování pro konstruktéry a technology*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
- [3] MINAŘÍK, V. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-01028-7.
- [4] KUČERA, J. *Teorie svařování*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1987.
- [5] Vzdělávací centrum společnosti ESAB: Jak nejlépe řezat ocelové plechy. *ESAB* [online]. Vamberk: ESAB, ©2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/what-is-the-best-way-to-cut-steel-plate.cfm>
- [6] Autogen, řezání plamenem. *Schinnkmna* [online]. Kosmonosy: Schinkmann, ©1991-2017 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/autogen>
- [7] TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarania*. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa). ISBN 80-05-00097-9.
- [8] KAŠPAR, J. Tepelné dělení materiálu kyslíkem. In *MM Průmyslové spektrum*, 2011, č.4, s 26. ISSN 1212-2572.
- [9] Několik slov k plazmovému řezání. *Honkys* [online]. Praha: Honkys, ©2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.honkys.cz/nekolik-slov-k-plazmovemu-rezani-neboli-paleni-plazmou>

- [10] Vzdělávací centrum společnosti ESAB: Jak řešit problémy s kvalitou řezu při řezání plazmou. *ESAB* [online]. Vamberk: ESAB, ©2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/how-to-troubleshoot-plasma-cut-quality.cfm>
- [11] Plazmové řezání. *Schinkmann* [online]. Kosmonosy: Schinkmann, ©1991-2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/plazma>
- [12] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonveční metody obrábění - 8. díl. In *MM Průmyslové spektrum*, 2008, č.10, s 32. ISSN 1212-2572
- [13] Laser. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [14] NOVÁK, M. Seriál na téma lasery - základní princip laserů a jejich dělení. In: *LAO* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2011 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [15] ŘASA, J., KEREČANINOVÁ, Z. Nekonveční metody obrábění - 4. díl. In *MM Průmyslové spektrum*, 2008, č.3, s 80-82. ISSN 1212-2572
- [16] NOVÁK, M.. Seriál na téma lasery - hlavní typy laserů. In: *LAO* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2011 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [17] NOVOTNÝ, J., DUBENSKÝ, R., Jiří DUNOVSKÝ, J. *Progresivní metody svařování a tepelného dělení materiálu: poradenská příručka č. 39*. Praha: Technickoeconomický výzkumný ústav hutního průmyslu, 1986.

- [18] KOŘÁN, P. Seriál na téma lasery - laserové řezání. In: *LAO* [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2013 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- [19] ROUBÍČEK, M. Kritéria volby metody a trendy tepelného dělení materiálu [online]. Praha: Air Liquide, ©2007 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/39822-Kriteriia-volby-metody-a-trendy-tepelneho-deleni-materialu-ing-martin-roubicek-ph-d-air-liquide.html>
- [20] Plazma přednosti a nevýhody. *Plazmacz* [online]. Tábor: Plazmacz, 2017 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.plazmacz.cz/plazma-prednosti-a-nevyhody/>
- [21] PTÁČEK, L.. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, ©2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [22] *Ferona: E-železná kniha* [online]. Praha: Ferona, ©2004-2017 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/cze/katalog/oceli.php?typ=2#>
- [23] *ČSN EN ISO 9013: Tepelné dělení - Klasifikace tepelných řezů - Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [24] ŠTENCL, M. *Vliv čistoty povrchu na adhezi povlaku*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2015, 60 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jitka Podjuklová, CSc

## Seznam příloh

## Příloha A – Atest materiálu S355J2+N

**舞阳钢铁有限责任公司**  
WUYANG IRON AND STEEL CO.LTD.

**质量证明书**  
QUALITY CERTIFICATE

产品名称: 热轧钢板  
PRODUCT: HOT ROLLED STEEL PLATE

订单号: 10415013  
CUSTOMER: UNION

合同号: 141E0169  
CONTRACT NO.: 141E0169

技术条件: AS PER EN10025-2: 2004  
TECHNICAL CONDITION:

证书号: 141E0169  
CERTIFICATE NO.: 141E0169

生产许可证号:  
PROCESS LICENSE NO.: 141E0169

车号:  
TRAIN NO.: 141E0169

QR/C07E05

牌号 STEEL GRADE	炉号 HEAT No.	批号 BATCH No.	尺寸 DIMENSIONS mm	重量 WEIGHT (t)	化学成分 0.001% CHEMICAL COMPOSITION										试样 TEST PIECE	拉力试验 TENSILE Result (MPa)	弯曲试验 BEND TEST 结果 Result Angle	冲击试验 IMPACT J	硬度 HB												
					*C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Mo	Ti	Nb						Ni	V	N	B	Ceq							
S355J2+N	13202967N0	CH324742 -1	260*2000*5800	1 23.676	0	170	360	1500	1.5	2	70	30	29	3	100	22	70	3	5.5	450	T 0	342	544	31.0	-20	162	L				
S355J2+N	13202967N0	CH324742 -1	260*2000*5800		0	170	360	1500	1.5	2	70	30	29	3	100	22	70	3	5.5	450	T 0				-40	65	L				
S355J2+N	13203098N0	CH324929 -1	220*2000*6950	1 24.005	0	180	300	1480	1.4	2	70	23	20	1	80	22	70	2	5.2	460	T 0	372	544	28.0	-20	178	L				
S355J2+N	13203098N0	CH324929 -1	220*2000*6950		0	180	300	1480	1.4	2	70	23	20	1	80	22	70	2	5.2	460	T 0				-40	152	L				

以下空白 留A/C

合计: 2 块 47.681 t  
TOTAL: 2 块 47.681 t

超声探伤: EN10609-99 STEEL  
ULTRASONIC TEST: EN10609-99 STEEL

供货状态: 正火  
CONDITION OF SHEET: NORMALIZED

1. 化学成分分析: 化学成分分析结果符合 EN10025-2: 2004 要求。  
2. 力学性能: 力学性能符合 EN10025-2: 2004 要求。  
3. 金相组织: 金相组织符合 EN10025-2: 2004 要求。  
4. 无损检测: 无损检测结果符合 EN10025-2: 2004 要求。

1. 无产品质量证明专用章无效。Effective with quality certificate stamping.  
2. 我们特此证明, 此证书上所述的材料已按照订单和材料规格要求进行生产和检验, 其结果符合要求。  
3. We hereby certify that the material described herein has been manufactured and tested with satisfactory results in accordance with the requirements of the above material specification and the terms of order.

生产单位: 舞阳钢铁有限责任公司  
PRODUCTION UNIT: WUYANG IRON AND STEEL CO.LTD.

地址: 中国河南省舞阳  
ADDRESS: WUYANG HENAN CHINA

电话(Tel): 0375-811264  
传真(Fax): 0375-8114006

检验机构: 舞阳钢铁有限公司  
INSPECTION INSTITUTION: WUYANG IRON AND STEEL CO.LTD.

日期: 2014 年 11 月 18 日  
DATE: 2014 YEAR 11 MONTH 18 DAY

证书号: 09011 34100 96501 26471  
CERTIFICATE NO.: 09011 34100 96501 26471




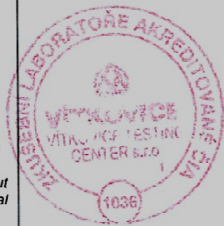
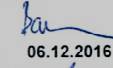
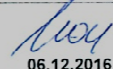
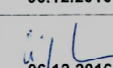
中国产品标准 GB/T 1591-2008  
CHINA PRODUCT STANDARD GB/T 1591-2008

CE 0035

WUYANG IRON AND STEEL CO. LTD.  
WUYANG HENAN CHINA



## Příloha B – Protokol o analýze množství prvků v oceli S355J2+N

		<b>VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.</b> Pohraniční 584/142 Hulváky 703 00 Ostrava						Str.: 1 / 1 Rev.: 0 Page: Rev.:			
Ke zkuš.listu: To testing form No.:	017/16 řj	Datum přijetí: Date of receipt:	01.12.2016	Zákazník: Customer:							
Výrobek: Product:	Plech/Plate 260 x 1090 x 2270 mm	Zakázka č. : Shop order No.:	-	Flash Steel Power, a.s. Martinovská 3168/48 Martinov 723 00 Ostrava p. Fuciman Jiří							
Číslo tavby: Heat No.:	13202967N0	Objednávka č. : Purchase order No.:	-								
Jakost: Grade:	S355J2+N	Norma: Standard:	-								
Ostatní poznámky pro objednatele: Client's notes:		-									
<b>PROTOKOL O ZKOUŠENÍ č.: 2016 / 47464</b> Test Report No.:											
<b>VÝSLEDKY ZKOUŠENÍ</b> Test results											
Vzorek Sample	Čís.vz. No.	C %	Mn %	Si %	P %	S %	Cu %	Ni %	Cr %	Mo %	V %
H03723	CHA324742	0,185	1,52	0,37	0,016	0,0013	0,080	0,064	0,067	0,029	<0,004
Vzorek Sample	Čís.vz. No.	Ti %	W %	Al-c %	Nb %	Co %	Zr %	B %	As %	Sn %	Pb %
H03723	CHA324742	<0,002	<0,010	0,037	0,021	0,014	<0,002	0,0004	0,012	0,005	<0,003
Vzorek Sample	Čís.vz. No.	Sb %	Ca %	Zn %	N %						
H03723	CHA324742	0,005	0,0005	<0,002	0,0069						
----- Konec výsledků zkoušení / End of test results -----											
Číslo zkoušky: Test number:	Identifikace metody: Method identification:	Prvek: Element:	Přístroj, ev. č. : Instrument, Inv. No:	Zkoušel: Tested by:							
3	QI-VTC.10 GEN-0002	C, S	CS-444, 946.10/013	HUB							
1	QI-VTC.10 GEN-0001	Mn, Si, P, Cu, Ni, Cr, Mo, V, Ti, W, Al-c, Nb, Co, Zr, B, As, Sn, Pb, Sb, Ca, Zn	SPECTROLAB 2000, 946.10/017	HUB							
4	QI-VTC.10 GEN-0003	N	TC-436, 946.10/008	OSU							
<b>Prohlášení:</b> Dosažené výsledky se týkají pouze zkušebního vzorku. Zkušebna neodpovídá za odběr zkušebního vzorku. Protokol je možno reprodukovat pouze celý, jinak s písemným souhlasem zkušebny.  <b>Statement:</b> The test results relate only to the sample. The Chemical laboratory does not take the responsibility for the sampling. The report shall not be reproduced except in full without the written approval of the chemical laboratory.				Datum zkoušení: Date of testing: 01.12.2016 - 06.12.2016		Ident: Ident: 200726204					
		Jméno/Tel: Name/Phone:		Funkce: Position:		Podpis/Datum: Signature /Date:					
		Vystavil: Prepared:		Baroňová 59 595 5483		Pověřený pracovník Entrusted person		 06.12.2016			
		Kontrola: Checked:		Ing. Nováková 59 595 7761		Ved. úseku spektrometrie FCHZ CHL Spectrometry Dep. Manager		 06.12.2016			
		Schválil: Approved:		Ing. Cigánová 59 595 7761		Vedoucí FCHZ CHL Manager		 06.12.2016			
Datum tisku: 06.12.2016 11:56:13      Id: 257755      Zdroj: PROT_CH_HV_V5.doc											
----- Konec protokolu o zkoušení / End of test report -----											